

VŠB – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA

Fakulta strojní

Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

Obrábění tvarových ploch armatur

Machining of Shaped Surfaces of Fittings

Student:

Vojtěch Vach

Osobní číslo

VAC0199

Vedoucí bakalářské práce:

prof. Ing. Robert Čep, Ph.D.

Ostrava 2020

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

Zadání bakalářské práce

Student: **Vojtěch Vach**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 2303R002 Strojírenská technologie
Téma: Obrábění tvarových ploch armatur
Machining of Shaped Surfaces of Fittings
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Úvod do problematiky.
2. Možnosti a strategie obrábění tvarových ploch.
3. Experimentální část.
4. Vyhodnocení experimentů a závěry.
5. Technicko-ekonomické zhodnocení.

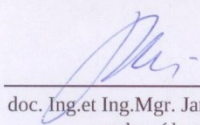
Seznam doporučené odborné literatury:


ČEP, Robert; SADÍLEK, Marek. *Technology of Machining and CAM Systems*. Ostrava : Ediční středisko VŠB – TU Ostrava, 2011, 122 s.
BRYCHTA, Josef; SADÍLEK, Marek; ČEP, Robert; PETRŮ, Jana. *Progresivní metody v obrábění*. Ostrava : Ediční středisko VŠB – TU Ostrava, 2011, 144 s. ISBN 978-80-248-2513-7. Dostupné na: http://projekty.fs.vsb.cz/019/dokumenty/Progresivni_metody_v_obrabeni_FINAL.pdf
NESLUŠAN, Miroslav; TUREK, Stanislav; BRYCHTA, Josef; ČEP, Robert (25%); TABAČEK, Marián. *Experimentálne metódy v trieskovom obrábaní*. Žilina : EDIS Žilina, 2007. 343 s. ISBN 978-80-8070-711-8.
BRYCHTA, J.; ČEP, R.; SADÍLEK, M.; PETŘKOVSKÁ, L.; NOVÁKOVÁ, J. *Nové směry v progresivním obrábění*. Ostrava : Ediční středisko VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2007. Dostupné na <http://www.elearn.vsb.cz/archived/FS/NSPO>. ISBN 978-80-248-1505-3.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **prof. Ing. Robert Čep, Ph.D.**

Datum zadání: 20.12.2019
Datum odevzdání: 18.05.2020


doc. Ing. et Ing. Mgr. Jana Petrů, Ph.D.
vedoucí katedry


prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty



Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 18. května 2020



.....
Podpis studenta

Prohlašuji, že:

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou bakalářskou*) práci se plně vztahuje zákon č.121/2000Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména §35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a §60 (Školní dílo),
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou bakalářskou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§35 odst.3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této bakalářské práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst.4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v jakémkoliv případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- beru na vědomí, že podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů – že tato bakalářská práce bude před obhajobou zveřejněna a na pracovišti vedoucího práce a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 18. května 2020.



Podpis studenta

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Vach, V. *Obrábění tvarových ploch armatur: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra automatizační techniky a řízení, 2020, 46 s. Vedoucí práce: Čep, R.

Bakalářská práce pojednává o možnostech výroby tvarových ploch armatur. V první části práce je sepsána současná technologická situace v dané oblasti. Na tu navazuje návrh výrobního procesu reálné součásti. Jednotlivé návrhy jsou poté podrobněji rozebírány a ohodnoceny dle technicko-ekonomického hlediska. Nejvhodnější možnosti výroby jsou navrženy pro finální realizaci řešené součásti.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

Vach, V. *Machining of Shaped Surfaces of Fittings: Bachelor Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Control Systems and Instrumentation, 2020, 46p. Thesis head: Čep, R.

Bachelor's thesis is dealing with the possibilities of production of shaped surfaces of fittings. In the first part of thesis is described the current technological situation in the field. This follows on design of the production process of a real component. The individual designs are then analyzed in more details and evaluated according to the technical and economic point of view. The most suitable production options are proposed for the implementation as solutions of final production.

Obsah

Seznam použitých symbolů a značek	7
Seznam ilustrací.....	8
Úvod.....	9
1 Úvod do problematiky.....	10
2 Možnosti a strategie obrábění tvarových ploch	11
2.1 Úvod.....	11
2.2 3-osé frézování tvarových ploch.....	12
2.3 Víceosé frézování tvarových ploch.....	14
2.4 CAD/CAM systémy v obrábění.....	17
2.5 Progresivní technologie obrábění	21
2.6 Eliminace vibrací nástroje	24
3 Experimentální část.....	30
3.1 Úvod.....	30
3.2 Návrh výroby tvarové části průniků ploch	32
3.2.1 Předhrubování průniků ploch	32
3.2.2 Výroba tvarových částí průniků ploch	34
4 Technicko-ekonomické zhodnocení.....	39
4.1 Předhrubovací metody.....	39
4.2 Dokončovací metody.....	41
Závěr	44
Literatura	45

Seznam použitých symbolů a značek

AWJM	abrazivní vodní paprsek	[–]
CAD	počítačová podpora konstruování	[–]
CAM	počítačová podpora výroby	[–]
CNC	počítačem číslicově řízený stroj	[–]
HFC	obrábění za vysokých posuvových rychlostí	[–]
HPC	vysokovýkonné obrábění	[–]
HRC	Tvrдость materiálu podle Rockwella	[HRC]
HRRM	obrábění za velkého úběru	[–]
HSC	obrábění za vysokých řezných rychlostí	[–]
HSM	vysokorychlostní obrábění	[–]
PVD	povlak nanesený odpařením z pevné fáze	[–]
a_e	radiální hloubka řezu	[mm]
a_p	axiální hloubka řezu	[mm]
D	průměr	[mm]
F_e	řezná síla	[N]
f_z	posuv na zub	[mm]
L	délka	[mm]
n	otáčky vřetene	[min ⁻¹]
R_a	průměrná aritmetická odchylka posuzovaného profilu	[μm]
R_m	mez pevnosti	[N·mm ⁻²]
T	teplota	[°C]
v_c	řezná rychlost	[m·min ⁻¹]
v_f	posuvová rychlost	[mm·min ⁻¹]

Seznam ilustrací

Obrázek 1 – Tvarové obrábění stopkovou frézou s rádiusem v rohu a kulovou frézou ...	12
Obrázek 2 – Postupné prodlužování nástroje při hrubování	13
Obrázek 3 – Konstantní tloušťka odebíraného materiálu.....	13
Obrázek 4 – Kinematika víceosých obráběcích strojů stůl-stůl.....	14
Obrázek 5 – Kinematika víceosých obráběcích strojů stůl-stůl-kolébka	15
Obrázek 6 – Kinematika víceosých obráběcích strojů hlava-stůl.....	15
Obrázek 7 – Kinematika víceosých obráběcích strojů hlava-hlava	16
Obrázek 8 – Hodnota řezné rychlosti podle náklonu vřetene nebo obrobku	16
Obrázek 9 – Náskres hierarchie výroby součásti pomocí počítačových podpor výroby	17
Obrázek 10 – Tužkové obrábění	19
Obrázek 11 – Využití proměnlivého posuvu při obrábění	19
Obrázek 12 – Schéma trochoidního frézování	20
Obrázek 13 – Vrtací (zapichovací) hrubování BORE JET	20
Obrázek 14 – Tvorba třísky u klasického a HSC obrábění	22
Obrázek 15 – Upínací systém bez pasivně-dynamického systému pro tlumení vibrací	25
Obrázek 16 - Upínací systém s pasivně-dynamickým systémem tlumení vibrací	25
Obrázek 17 – Polygonální upínací systém Tribos patentovaný firmou Schunk	26
Obrázek 18 – Schéma univerzálního upínače Sino	27
Obrázek 19 – Hydraulické upínání firmy Schunk řady Tendo	28
Obrázek 20 – Tepelné upínání s několika prodlouženími současně	28
Obrázek 21 – Grafické vyobrazení části tělesa šoupátka	31
Obrázek 22 – Tloušťky stěn těla šoupátka	31
Obrázek 23 – Problematika neobrobené plochy při 3-osém hrubování.....	34
Obrázek 24 – 3-osé hrubování tvarové plochy.....	35
Obrázek 25 – 3-osé dokončování řádkováním	36
Obrázek 26 – 3-osé dokončování Z-průřezy	36
Obrázek 27 – 5-osé dokončování tvarové plochy.....	38

Úvod

Strojírenství je v dnešní době využíváný a rychle se rozvíjející průmysl, a proto se nelze divit, že se s ním setkáváme ve vojenství, automobilu, dopravě a mnoha dalších odvětvích průmyslu. Samotná strojírenská výroba se tak musí rozdělovat do mnoha různých částí, jelikož pro každé odvětví či samotný výrobek je potřeba se zaměřit na zcela odlišný prvek výrobku nebo na rozličné parametry. Tím se návrh technologií stává velmi potřebnou a obtížnou částí výrobního cyklu. Pro co nejlepší zvládnutí této části výroby jsou zapotřebí zkušenosti a vzdělání zaměstnanci a rovněž je třeba minimalizovat negativní ekonomický dopad na provoz.

Výrobní proces ovšem není pouze o technologiích a strategiích. Kromě strojírenství je důležitý i rozvoj mnoha dalších průmyslů, abychom mohli vůbec uvažovat nad využitím dané strategie nebo nad zlepšením jejího průběhu. Z toho důvodu je nutné nové povlaky, nástrojové držáky, výrobní zařízení, nové materiály, progresivní strategie a technologie vyvíjet současně a udržovat jejich pokrok v rovnováze.

Celá práce je rozčleněna do několika kapitol. První kapitola se skládá z rozboru současné situace v oblasti obrábění tvarových ploch. Druhá kapitola je poté věnována teoretickému rozboru technologií a možností souvisejících s výrobou tvarových ploch. Tato kapitola je rozdělena na několik bodů věnovaných specifickým částem výroby. V první části je rozebrána stavba a problematika využívání 3-osých a 5-osých frézovacích center. Druhá část je poté věnována začlenění počítačových podpor výroby do provozů. Jelikož velkou roli v návrhu výroby hraje způsob provedení jednotlivých pohybů nástroje, je potřeba věnovat pozornost především strategiím, cyklům a možnostem zefektivnění výroby s využitím CAM systémů. Předposlední blok teoretické části je věnován progresivním obráběcím technologiím. Přesněji se jedná o popis principu jejich funkčnosti, výhod a nevýhod dané technologie a nároků, které vyvíjí na stroj, nástroj nebo obráběný materiál. Na závěr je rozebrán způsob, kterým je možné tlumit samobuzené chvění nástroje, nejčastěji vzniklé velkým vyložením nástroje nebo využitím progresivní technologie obrábění.

Třetí kapitola využívá veškerých znalostí nabytých v teoretické části pro technologický návrh výroby tvarových částí průniků ploch u středotlakého šoupátka. Návrh se skládá z technologií pro předhrubování daných průniků a poté pro jejich dokončení. Výsledkem této kapitoly by měla být co nejekonomičtější a nejefektivnější kombinace technologií, která bude splňovat veškeré požadavky kladené na výrobu. Poslední kapitola je poté věnována vyhodnocení celé práce. Při navrhování výroby je totiž velkou otázkou, jak moc výhodné je využití daných technologií v určitých případech a jaké jsou možné alternativy. Je tedy potřeba před zahájením výrobního procesu zhodnotit veškeré faktory jak z technologického, tak i z ekonomického hlediska.

1 Úvod do problematiky

Neustálá nutnost konkurenceschopnosti nutí výrobce zdokonalovat a inovovat výrobní procesy. Dochází tak k nepřetržitému koloběhu zavádění nových a progresivních technologií, strategií a výrobních prostředků. Efektivnost, zkrácení výrobních časů nebo zvýšení kvality výroby u výrobků, které jsou stále náročnějších na zhotovení, jsou jen některé z řady aspektů, kterými je potřeba se v současné době rychlého rozvoje techniky zabírat.

I přes velké množství nových technologií nemusí být vždy pro firmu výhodné se tímto směrem vydat. Mnohdy se tak jedná o renovování nebo drobné vylepšování již zaběhnutých postupů. Velké množství technologií, které jsou zavedeny již téměř sto let, se nadále posouvají kupředu, a i na tyto změny je třeba náležitě odpovídat. Ne vždy je toto ovšem dostatečné řešení a je potřeba přistoupit k radikálnějším změnám ve výrobě. Vytváří se tak prostor pro zavádění progresivnějších metod výroby, jako jsou například víceosá obráběcí centra nebo nekonvenční způsoby obrábění.

Nedílnou součástí inovací v dnešní době je ekologičnost výroby. Jedním z největších trendů této problematiky je snaha o vytvoření výrobních strategií, u kterých není nutnost využívat procesní média. Tyto pokusy dále vedou k rozvojem v nástrojářském odvětví. Celková trvanlivost jak konstrukce nástroje, tak i spotřebního zboží s ním spojeného může mít značný vliv při snaze o snížení dopadu průmyslové výroby na životní prostředí.

Obrovský rozvoj počítačových technologií zapříčinil zavádění počítačových podpor pro výrobu. Firmy se proto snaží o zkrácení časů potřebných pro přípravu výroby a její realizaci. Také jde zde o pokus o minimalizaci či celkovou eliminaci chyb vzniklých v předvýrobní části, na které se většinou přijde až po realizaci výrobního procesu.

I přes automatizaci většiny procesů je člověk hlavním článkem celého podniku. Bez dostatečně kvalifikovaných a neustále se vzdělávajících pracovníků není možné, aby se jakékoliv z těchto změn mohly stát skutečností.

2 Možnosti a strategie obrábění tvarových ploch

2.1 Úvod

Výroba tvarových ploch se provádí už mnoho desítek let. V dnešní době se ovšem čím dál více setkáváme s volně tvarovanými a parametrickými plochami v běžné strojírenské výrobě. Tyto nepravidelné plochy vyžadují využití prostorového obrábění a počítačových podpor pro výrobu.^{1,2}

Pro obrábění tvarových ploch využíváme technologie 3-osého nebo víceosého obrábění. Při 3D frézování tvarových ploch jsem schopni současně obrábět ve třech osách, které jsou většinou označovány jako X , Y a Z . Progresivnější technologii je poté víceosé obrábění, které pro obrábění využívá pět a více os. Tyto osy mohou představovat například naklápění a rotaci stolu nebo náklon a rotaci nástroje. Díky těmto možnostem jsme schopni mnohem efektivněji vyrobit požadovanou tvarovou plochu na menší počet upnutí za kratší čas.^{1,2}

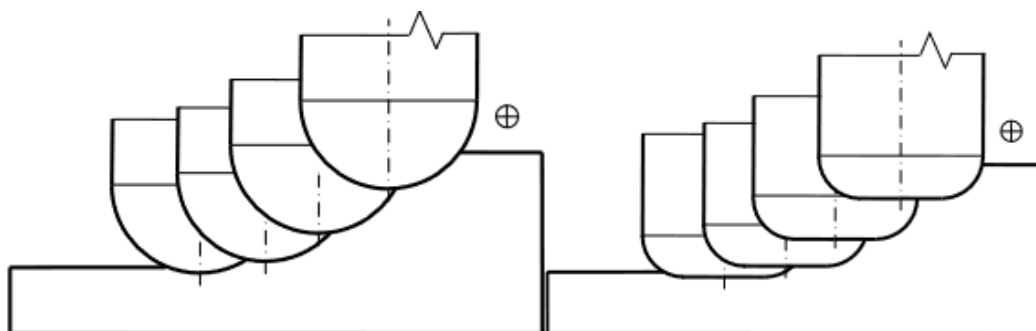
Z důvodu obtížnosti a časové náročnosti nastavení a naprogramování stroje se snažíme zavádět do výroby CAD/CAM systémy, které nám zlepší efektivnost, produktivitu, rychlost výroby a také přesnost. Tyto systémy nám také nabízejí možnost upravovat dráhy nástrojů, generování řezných podmínek a spousty dalších strategií, které mají za účel lepší produktivnost a prodloužení životnosti nástroje.^{1,3}

Jelikož při výrobě tvarových ploch v dnešní době převážně využíváme velice progresivní technologie, jako jsou nejnovější nástrojové držáky s proti vibračními systémy a metody prostorového obrábění, snažíme se také co nejvíce optimalizovat a zproduktivnit metody obrábění. Mezi tyto strategie řadíme například HSC, HPC, HFC a jiné, které snižují cenu výrobku a zároveň zlepšují jeho rozměrovou i tvarovou přesnost.^{4,5}

Tvarové plochy jsou často složité, a vyžadují tak speciální nástroje a velice velké vyložení. To vše si s sebou nese spousty nevýhod, z nichž jedna z nejdůležitějších je tvorba vibrací při velkém vyložení nástroje. Vibrace nám poté zhoršují kvalitu povrchu, snižují výkonnost stroje i jeho bezpečnost a spolehlivost. Mnohdy tomu ale nemůžeme nijak zabránit, protože pak by mohlo dojít ke kolizi nástroje s obrobkem. Pokud jsme opravdu nuceni kvůli tvaru plochy obrábět s velkým vyložení, využíváme různé způsoby, jak potlačit negativní efekty s tím spojené. Jedním z nich je například využití specifických nástrojových držáků se schopností tlumení vibrací. Zde si můžeme vybrat ze široké palety nástrojových držáků různých firem a specifikací. Nemusí nás tedy zajímat pouze specifikace tlumení vibrace, ale také hodnoty obvodového házení, bezpečnost upnutí, životnost nástrojů, doba a složitost výměny nástrojů, popřípadě vhodnost pro různé progresivní metody obrábění.^{5,6,7}

2.2 3-osé frézování tvarových ploch

Patří mezi běžné způsoby obrábění tvarových ploch na CNC frézovacích centrech. Pokud to složitost tvarové plochy vyžaduje, jsme touto metodou schopni se pohybovat ve třech osách zároveň. Obrábění je prováděno stopkovou frézou s rádiusem v roh nebo s kruhovými vyměnitelnými břitovými destičkami. Druhou možností jsou kulové frézy celokarbidové, s vyměnitelnými hlavicemi nebo břitovými destičkami. Při obrábění dochází ke vzniku výstupků na obrobeném povrchu vlivem kroku přejezdů, zakřivení povrchu a rádiusu nástroje viz. Obrázek 1.^{1,8}



Obrázek 1 – Tvarové obrábění stopkovou frézou s rádiusem v rohu a kulovou frézou⁸

Samotný proces je rozdělen do tří základních částí. Jedná se o hrubování, předdokončování a dokončování. Při hrubování je hlavním cílem odebrat co největší část materiálu polotovaru za co nejkratší čas. Necháváme si ovšem přídavek na budoucí operace. Jelikož neklademe vysoký důraz na drsnost povrchu nebo rozměrovou přesnost, zaměřujeme se při výběru nástroje především na vysokou účinnost při odebírání materiálu a životnost nástroje. Po samotném hrubování se často uplatňují dohrubovací operace, které mají za úkol odebrat materiál na místech, kde se nemohl dostat nástroj při základní operaci. K tomu využíváme nástroje s menšími průměry. Výpočet a výběr oblastí, kde je nutné dohrubovací operace zavést, dělá CAD/CAM systém. Ten využívá informace o požadovaném tvaru, rozměru nástrojů, přídavek pro budoucí operace a současném stavu obrobku pro určení veškerých drah nástroje.^{2,8}

Při obrábění vnitřních tvarů musíme prodlužovat délku nástroje postupně. Použití finální délky nástroje hned ze začátku by nám sice ukrátilo čas výměny či prodloužení, bylo by to ovšem velice neproduktivní. Kvůli většímu vyložení se nám totiž zvyšuje riziko vzniku vibrací. Je nejefektivnější tedy začínat s nejkratší délkou a poté ji navyšovat. Pro každou z délek je poté nutné nastavit specifické rezní podmínky, abychom dosáhli maximální produktivity.⁹

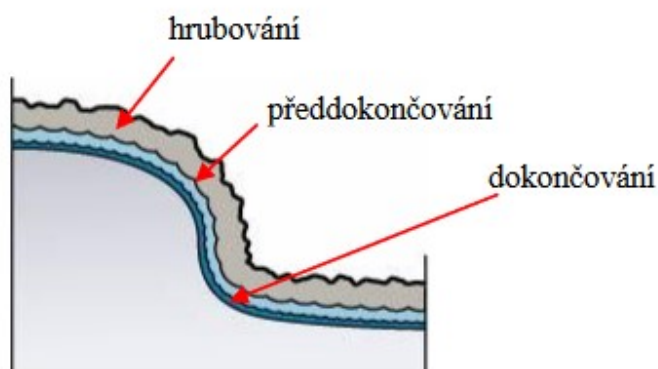


Obrázek 2 – Postupné prodlužování nástroje při hrubování ⁹

Předdokončovací frézovací operace mají za úkol odstranit schody (výstupky) a stopy po hrubování. Při tom ovšem chceme zanechat přídavek jednotné tloušťky pro další operaci. To je velice důležité pro celkové zvýšení přesnosti hotového výrobku. Mnohem více dbáme na výsledný tvar a vzhled povrchu než u předešlé operace. I po těchto operacích často ještě následují další operace pro odstranění materiálu z těžko přístupných míst, jako jsou například rohy a kouty. ²

Poslední je tedy dokončovací frézování. V této fázi nám jde již o zhotovení hotové tvarové plochy. Nejdůležitějšími kritérii jsou drsnost povrchu a rozměrová přesnost obrobku. Nejčastěji chceme tuto část obrábění provést pomocí jednoho nástroje. Díky tomu omezíme stopy nástroje, které nám vznikají na povrchu obrobku. Musíme však poté klást vysoký nárok na trvanlivost nástroje. Dokončovací operace obvykle trvá nejdelší dobu, a to z důvodu malé rychlosti posuvu a hloubky řezu. ²

Pro zajištění co nejlepšího tvaru je nutné odebírat stále konstantní tloušťku materiálu. Proto se snažíme rozložit přídavky na obrábění rovnoměrně. Daný nástroj poté nemá časté změny pracovního zatížení, a to se projeví na zvýšení přesnosti hotového výrobku a minimalizaci otlačení nástroje. ^{2,9}



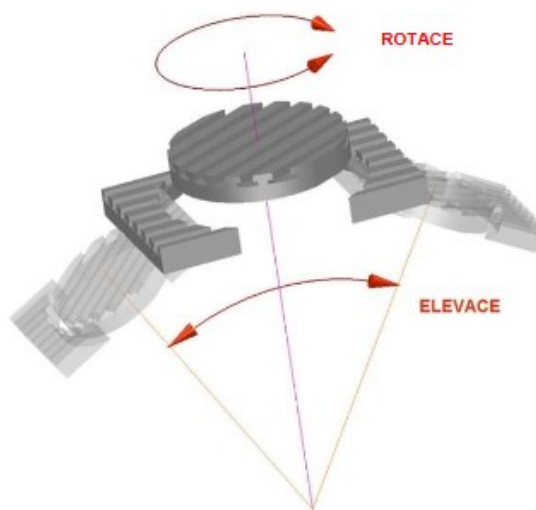
Obrázek 3 – Konstantní tloušťka odebíraného materiálu ⁸

2.3 Víceosé frézování tvarových ploch

Mezi technologie víceosého obrábění patří ty, u kterých využíváme více než tři osy. Nejběžněji využívané jsou technologie 5–osého frézování. Využíváme ovšem také 4–osé anebo 9–osé obrábění. V opravdu speciálních případech nemusíme být nijak omezováni a můžeme mít tolik os, kolik bude potřeba. Existují dokonce i případy, kdy byly pro víceosé obrábění využity stroje s více než 100 osami. Využitím technologií obrábění více osami jsme schopni obrábět plochy s jakoukoli orientací a docílit takových zakřivených povrchů, které by normálními metodami 3–osého obrábění nebylo možné vyrobit. Jsme totiž schopni plynule natáčet obrobkem, vřeteníkem nebo oběma současně. Nemáme tedy takovou potřebu měnit nulový bod obrábění nebo upnutí obrobku ve stroji. Také díky vyklonění nástroje jsme schopni zkrátit vyložení. To má za následek snížení rizika vibrací, a tedy prodloužení životnosti nástroje a zlepšení kvality povrchu.^{1, 8}

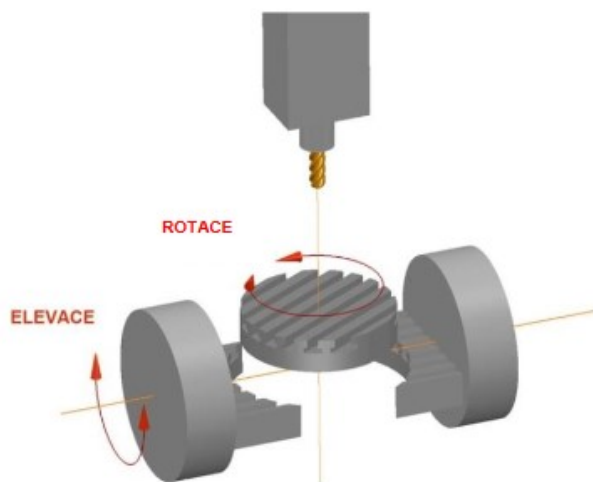
Kinematiku víceosých obráběcích strojů rozlišujeme do několika druhů, které jsou rozdělovány podle os stroje. Za základní považujeme tři lineární osy X, Y, Z. K těmto osám můžeme přidat ještě rotační osy A, B, C. Ty části stroje, které jsou přiřazeny k rotačním osám, nám poté určují druh obráběcího stroje. Základní rozdělení víceosých obráběcích strojů je na: stůl–stůl, hlava–stůl a hlava–hlava.^{1, 8}

Pokud má stroj koncept kinematiky stůl–stůl, je tím myšleno, že rotační pohyb otočný i rotační pohyb náklonu je zajištěn sklopným stolem stroje. Osa náklonu je tak umístěna z pravidla pod úhlem 45 stupňů nebo vertikálně. Samotné stroje pak mohou být vertikální nebo horizontální. Vyznačují se velice vysokou tuhostí a relativně jednoduchým odjezdem nástroje od obrobku z důvodu realizace vřetene ve vertikálním směru.^{1, 10}



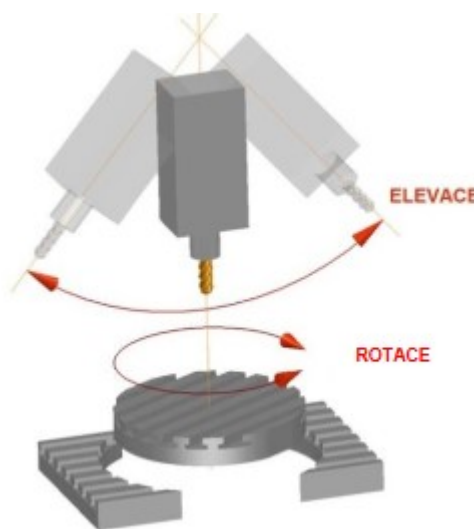
Obrázek 4 – Kinematika víceosých obráběcích strojů stůl–stůl¹⁰

Tento koncept může být zpracován také jako stůl–stůl–kolébka. Jediným rozdílem u tohoto typu je způsob uchycení stolu. To je realizováno pomocí uchycení obou konců stolu většinou podle osy X.^{1, 10}



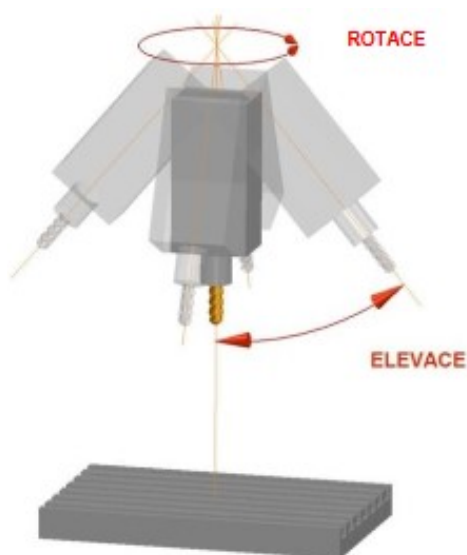
Obrázek 5 – Kinematika víceosých obráběcích strojů stůl-stůl-kolébka ¹⁰

Další koncepcí je hlava-stůl. Hlava vykonává rotační pohyb podle úhlu náklonu. Stůl poté koná rotační pohyb pomocí rotace stolu. Dohromady vytvářejí tužší soustavu, než je tomu v případě konfigurace hlava-hlava. Využívá se především pro obrábění součástí leteckého a automobilového průmyslu. Pokud stroj nabízí možnost sklíčidla s podporou koníku, lze jej využít i pro obrábění velmi dlouhých rotačních kusů. ^{1, 10}



Obrázek 6 – Kinematika víceosých obráběcích strojů hlava-stůl ¹⁰

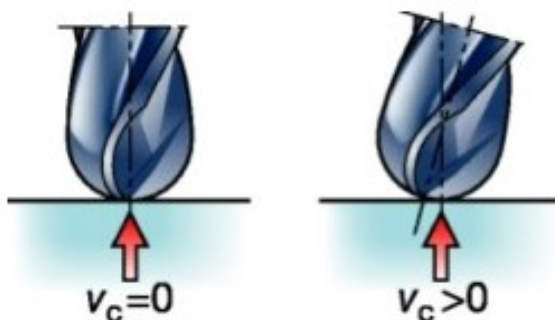
Poslední koncepcí víceosých obráběcích strojů je hlava-hlava. Jedná se o stroje s dvouosým natáčením vřeteníku. Oba rotační pohyby jak náklon, tak rotaci provádí pouze hlava. To nachází hlavně využití u velice rozměrných anebo dlouhých obrobků. Problémem je relativně malá tuhost při porovnání s ostatními koncepty. Jsme také omezeni úhlem rotace do hodnot kolem 360 stupňů. Nejčastěji tento typ víceosých obráběcích strojů využíváme u portálových strojů s velkým pojezdem. Zde můžeme frézovací nástroj vyměnit například za hlavu pro řezání vodním paprskem, hlavu plazmy nebo laseru. Díky tomu získáme mnohem širší využití pro tyto stroje. ^{1, 10}



Obrázek 7 – Kinematika víceosých obráběcích strojů hlava-hlava ¹⁰

Při aplikaci víceosého obrábění lze zefektivnit obráběcí proces pomocí využití efektivního rádiusu nástroje. Při obyčejném frézování kulovými frézami svírá nástroj a materiál pravý úhel. Na ostří v ose frézy je nulová řezná rychlost. V tomto bodě při obrábění nástroj zatlačuje materiál obrobku. Kvůli tomu v tomto místě dochází ke zvýšené tvorbě nárůstku, přechování třísky a zvyšování teploty. Sníží se nám trvanlivost nástroje a zhorší povrch. Proto se tomu snažíme vyvarovat, a to buď nakloněním nástroje, anebo nakloněním obrobku. ^{1,9}

Volba vhodného úhlu ovšem není jednoduchá. Různé literatury se s hodnotami velice rozcházejí, a tedy se nedá s přesností říct, která hodnota je ta nejsprávnější. Dle literatury [9] je nejvhodnější rozmezí 10 až 15°. Literatura [1] tento údaj rozšiřuje až na možných 30°. Záleží především na obráběcím stroji, typu a parametrech dané frézy, řezných podmínkách, materiálu obrobku apod. ^{1,9}

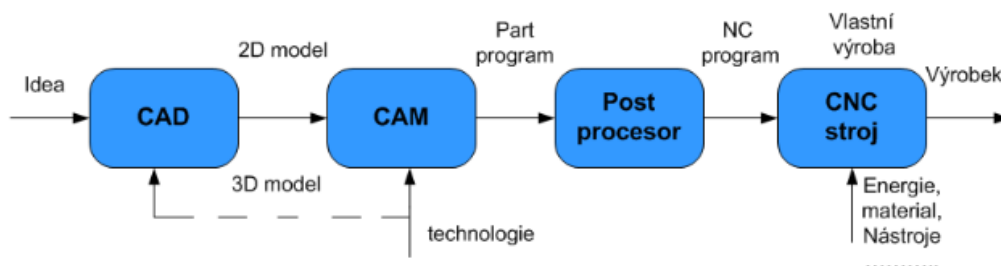


Obrázek 8 – Hodnota řezné rychlosti podle náklonu vřetene nebo obrobku ⁹

2.4 CAD/CAM systémy v obrábění

Tyto systémy v podstatě využíváme jako počítačovou podporu pro návrh a výrobu součástí. Jedná se především o zápustky, formy a další jiné tvarově složité součásti. Umožňují nám zvýšení efektivnosti výroby, a to především zvýšením rychlosti obrábění, přesnosti výroby, rychlosti programování a eliminace možných chyb.^{3, 11}

Postup výroby součásti v CAD/CAM systémech prochází od samého nápadu až ke konečnému výrobku. Jedná se o souhrn činností, které se vykonávají na jednotlivých rozhraních a dohromady nám vytvářejí hierarchii výroby součástí pomocí počítačových podpor výroby.³



Obrázek 9 – Nákres hierarchie výroby součásti pomocí počítačových podpor výroby³

Idea je v podstatě základní myšlenka celého konceptu výrobku. Udává nám účel výrobku a také jeho tvar, rozměry a budoucí možné požadavky pro výrobu součástí.³

CAD (Computer Aided Design) = počítačová podpora konstruování. Jedná se o podporu pro vytvoření modelu a výkresové dokumentace. Dalo by se tedy říct, že naši základní myšlenku převedeme do počítačové podoby, abychom ji dále mohli upravovat. Také nám tyto systémy dávají možnost otestovat model výrobku. Jste tak například schopni snadno predikovat možná slabá místa a přizpůsobit tomu tak výrobu nebo upravit stávající model.^{3,}

11

CAM (Computer Aided Manufacturing) = počítačová podpora výroby. Tento modul pro počítačovou podporu výroby využívá geometrická data z CAD systému, aby vytvořil program pro automatickou výrobu součástí. Můžeme pro tento proces využít geometrické útvary prostorové nebo geometrické útvary v rovině. Výsledkem celé činnosti je partprogram. Jde o sled technologických operací nezbytných pro výrobu součástí. Tyto operace jsou tvořeny kódovým zápisem příslušné technologie a geometrie součásti. Při tvorbě těchto programů je nutné pracovat s různými druhy informací. Například je potřeba vycházet z typu stroje, geometrie polotovaru, geometrie nástrojů a výsledného obrobku. Dále to jsou řezné a technologické podmínky, nebo například pozice nástrojů a korekce. Všechny tyto informace nám musí být známy před tím, než začneme pracovat se samotným programem. Výhod těchto systémů je mnoho, tou hlavní je možnost využít různé progresivní strategie, které nám mohou urychlit výrobu a zároveň zlepšit přesnost výrobku a životnost

nástroje. Také nám nabízí možnosti generování řezných podmínek, využití adaptivního proměnlivého posuvu, kontrolu kolize držáku nástroje a podobně.^{1, 3, 11}

Konečnou fází před samotným obráběním provádí postprocesor, který jednotlivé geometrické a technologické informace převádí do souřadnicového systému příslušného obráběcího stroje. Tyto informace také upravuje s ohledem na daný stroj. Přihlíží přitom na pracovní možnosti stroje a určuje rozpoložení pozic nástrojů v zásobníku nebo revolverových hlavách. Výsledkem je řídicí program, ve kterém pracuje řídicí systém stroje.^{3, 11}

Samotné programování v CAD/CAM systémech může být prováděno více způsoby. Který ze způsobu bude využit nejvíce, ovlivňuje složitost součásti a složitost její výroby. Pokud by mělo být programování pomocí jednotlivých příkazů příliš zdoluhavé, můžeme využít další různé varianty až po manažera strategií. V něm vytváříme vývojové diagramy, a to bez potřeby znalosti programovacího jazyka.^{3, 5}

Jedním z nejdůležitějších aspektů využití CAD/CAM systémů je možnost použití vyspělých strategií obrábění. Použitím správné variace strategií lze docílit zvýšení životnosti nástroje, zlepšení povrchu a snížení času na obrábění. Některé strategie mohou také ovlivňovat rozměrovou přesnost obráběcího procesu. Lze tedy říct, že zvolení vhodné strategie nám především ovlivní ekonomické aspekty výroby, výsledky obrábění a jakost obrobku.¹

Mezi současné progresivní strategie patří:

- Funkce dokončování rovného povrchu

Vyhledá rovné plochy na modelu a poté vygeneruje dráhu nástroje, který odstraní veškeré nerovnosti po předešlé dokončovací operaci.¹²

- Obrábění zbytkového materiálu

Jedná se o velice rozsáhlou oblast strategií při obrábění tvarových ploch pomocí CAM systémů. Jsou využívány převážně u víceosého obrábění, i když jejich využití nalezne i u 3D frézování. Nejčastěji jsou to operace, jejíž účelem je dokončit předešlou operaci tím, že doobrobíme místa, kde se nemohl dostat nástroj v předešlé operaci. Můžeme se setkat například s dohrubovací operací, při které je obráběn materiál v rozích a v místech, kde se nedostal nástroj při hrubování.¹

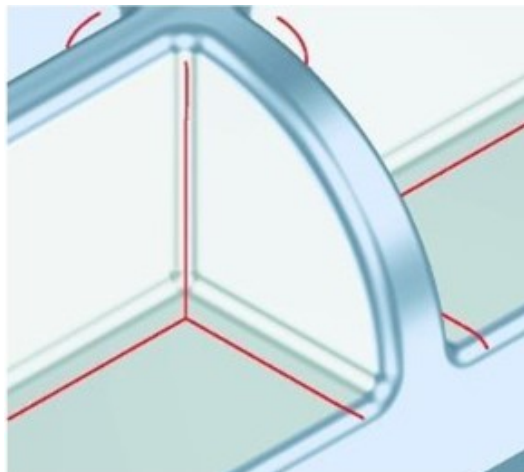
- Rychlostní obrábění

Tato funkce zaobluje dráhu nástroje automaticky tak, aby bylo dosaženo co nejvyšší konstantní rychlosti a eliminovaly se rázy, které vznikají při náhlých změnách směru. Využívají se k tomu S křivky a trochoidální pohyby nástroje, jimiž se zajistí přejezd mezi drahami nástroje. Můžeme také využít pomocných (doplňkových) vrstev, které nám

pomohou zajistit konstantní objemový úběr materiálu, pokud je nutné obrábět celým průměrem nástroje.¹²

- Tužkové obrábění

Funkce zajišťuje dokončování rádiusů a koutů.¹



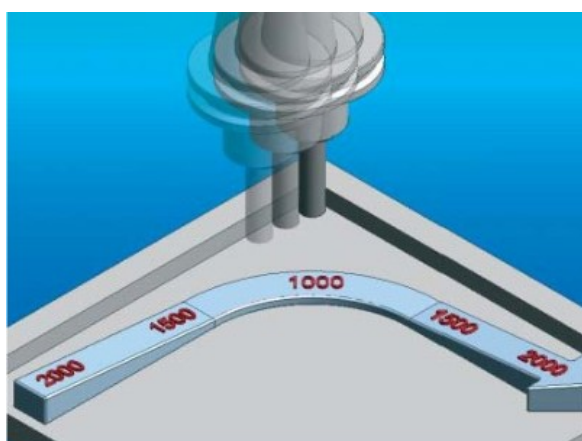
Obrázek 10 – Tužkové obrábění¹

- Kontrola kolize držáku nástroje

Funkce provádí výpočty nejmenší možné délky držáku nástroje a poté rozdělí dráhu na část s kolizí a část bez kolize. Část s kolizí musí být obrobena jiným nástrojem, způsobem upínání, anebo máme možnost využít vyklopení nástroje.¹²

- Proměnlivý posuv

Funkce umožňuje měnit hodnoty posuvové rychlosti pomocí vytyčovacích značek, a to na jakékoliv části dráhy nástroje. Díky tomu jsme schopni obrábět efektivněji, a dokonce i s lepší přesností. Na Obrázek 11 je tato strategie využita na obrábění rohu součásti.¹



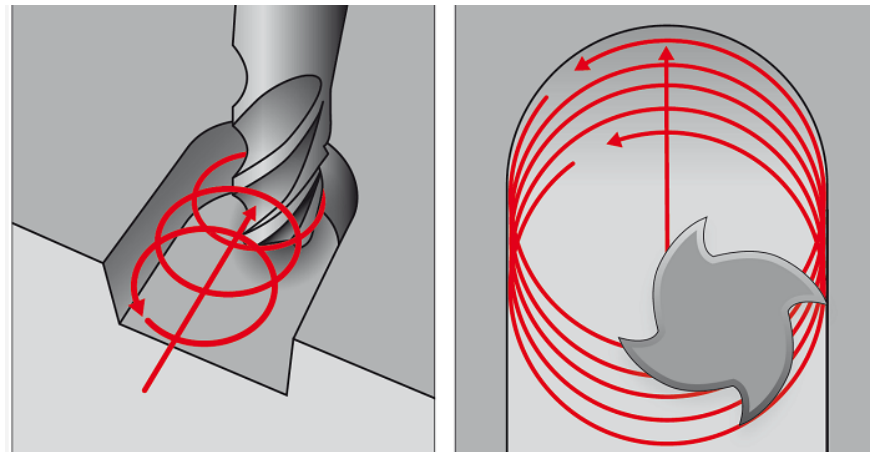
Obrázek 11 – Využití proměnlivého posuvu při obrábění¹

- Automatický výběr nástrojů

Funkce analyzuje povrch modelu pro automatický výběr nástrojů z databáze, které budou nejefektivnější pro obrábění dané části povrchu.¹

- Trochoidní frézování

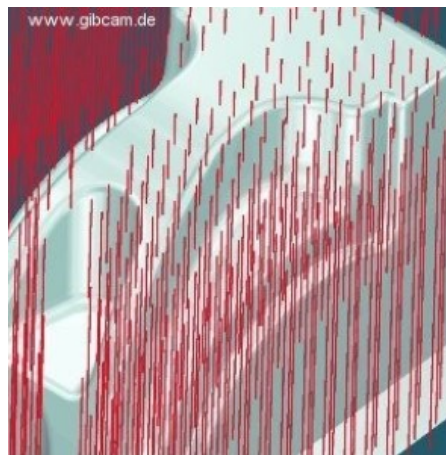
Tato metoda využívá současně posuv vpřed v radiálním směru a kruhovou interpolaci. Je vhodná pro polodokončovací nebo hrubovací obrábění kapes, hlubokých drážek, odfrézování rohu po předchozí operaci a obrábění obecných ploch. Důležité je i zvolení takového tvaru, aby v něm bylo možné vytvořit spirálovitou dráhu nástroje. Proto pokud se jedná například o frézování drážek, musí být poměr šířky drážky k průměru nástroje pod 70 % a radiální hloubka řezu a_e maximálně do 5 % průměru nástroje. Toto s sebou ovšem nese i výhodu, a sice že jsme schopni ušetřit za náklady na nástroje, jelikož nám postačí menší rozměr nástroje. Metoda se vyznačuje vysokou efektivností, zkrácenými obráběcími časy, větší bezpečností a vyšší životností nástroje. Z důvodu malých hodnot radiální hloubky řezu a_e a velkých hodnot axiální hloubky řezu a_p nám funkce zaručuje záběr jedním, maximálně dvěma břity zároveň. Dochází tak k velmi malým řezným odporům při obrábění.¹³



Obrázek 12 – Schéma trochoidního frézování¹³

- BORE JET – vrtací hrubování

Jedná se o velmi produktivní hrubovací strategie frézování využívající speciální nástroje pro úběr velkého objemu materiálu. To se provádí zapichováním, kdy nástroj vykonává sérii vrtacích pohybů v pravidelně uspořádané síti bodů.¹



Obrázek 13 – Vrtací (zapichovací) hrubování BORE JET¹

- Koncentrická strategie hrubovacího cyklu

Tato funkce má za úkol zaručit, že bude vždy dodrženo sousledné nebo nesousledné obrábění, stálost průřezu třísky a zamezení vjezdu do plného materiálu celým průměrem nástroje. ¹²

- Přiřazení různým oblastem rozdílné přídavky na obrábění

Různým oblastem můžeme dle naší potřeby nastavit rozdílné přídavky. Velikost těchto přídavek se měří kolmo k povrchu. Pokud se oblasti překrývají, je platný vždy větší z přídavek. ¹

- Tvorba vlastních maker

Nejčastěji se využívají již makra předem vytvořená. Tato funkce nám ovšem umožní ve speciálních případech vytvořit vlastní odjezdová, přejezdová a nájezdová makra. To se provádí pomocí grafického menu. ¹

2.5 Progresivní technologie obrábění

Technologický proces lze hodnotit na základě čtyř faktorů. Popisují daný technologický systém technologicky, ekonomicky, ekologicky a sociálně. Všechny tyto dílčí charakteristiky nám udávají popis nejen efektivnosti výroby, ale také její ekonomičnosti a ekologického dopadu na prostředí. V současné době se snažíme vyvíjet a využívat takové technologie, které zkrátí výrobní cykly, zvýší jakost výrobku, zlepši ekonomický rozvoj a ekologický dopad výroby. ¹⁴

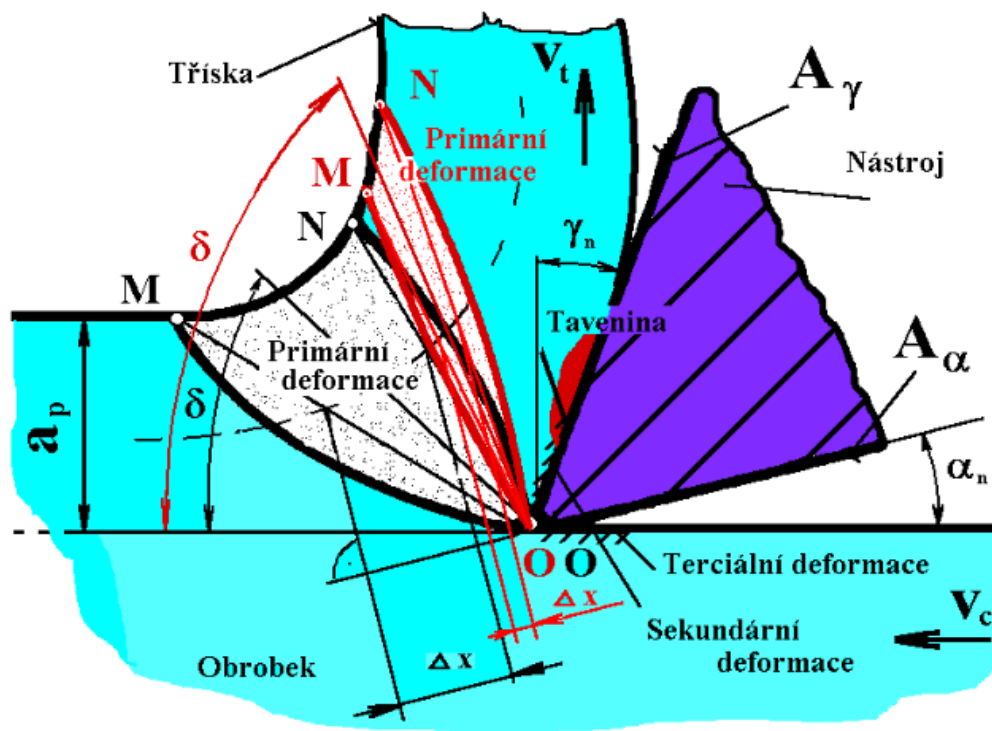
Mezi tyto technologie obrábění řadíme:

- HSC (High Speed Cutting) – obrábění za vysokých řezných rychlostí

HSC technologie se vyznačuje vysokou relativní rychlostí nástroje vzhledem k obrobku. Také máme možnost tuto technologii provádět bez chlazení, a díky tomu tak nemusíme řešit procesní médium a jeho odbornou likvidaci. Máme možnost obrábět velmi tvrdé a tepelně zpracované materiály, které by musely být jinak obráběny broušením. Nejčastěji se setkáváme s řeznými materiály, jako jsou povlakované slinuté karbidy, keramika, cermety, polykrystalický kubický nitrid boru a polykrystalický diamant. ¹⁴

Vysokorychlostní obrábění probíhá při teplotě třísky, která se blíží k teplotě tavení pro obráběný materiál. Při dané řezné rychlosti dojde ke změnám vlastností třísky. Především se jedná o změny chemické, mechanické a metalurgické. Nastává zde další spousta různých změn, které většinou souvisí se samotným odchodem třísky. Zmenší se průřez odcházející třísky, řezný odpor, třecí síla, přitlačná síla na čelo nástroje způsobovaná třiskou a zvětší se rychlost třísky při odchodu z řezu. Zmenšením kontaktní plochy mezi třiskou a nástrojem a omezením sekundárního nárustu tepla třísky v této kontaktní ploše dochází k minimálnímu přenosu tepla mezi nástrojem a třiskou. Tím až 95 % vygenerovaného tepla odejde v tříse.

Také to zapříčiní, že koeficient tření nezůstává konstantní. Čím větší bude řezná rychlost, tím bude koeficient tření pro HSC obrábění klesat. Pokud je v extrémních případech dosažena teplota tavení, tříska bude na své spodní straně vytvářet tekuté vrstvy. Tím roste zakřivení a klesá pýchování třísky. Díky zmenšenému pýchování třísky bude narůstat úhel kluzu, a tím se podstatně zredukuje přetvárná práce.⁴



Obrázek 14 – Tvorba třísky u klasického a HSC obrábění⁴

Aby tato metoda fungovala správně, musíme si klást velké požadavky jak na stroj, tak na nástroje.

Stroje se musí vyznačovat vysokými otáčkami vřetene a vysokými posuvovými rychlostmi. Upnutí musí být velice přesné a splňovat co nejmenší tolerance obvodové házivosti. Stroj musí být schopen vynikajícího tlumení kmitů a případného hluku vzniklého chlazením, pohonem, odchodem třísky a podobně. Pokud by došlo ke zničení rotujícího nástroje, je potřeba, aby konstrukce byla schopna zachytit veškeré možné úlomky s obrovskou kinetickou energií. To stejné platí pro třísky odcházející z místa řezu.⁴

Nástroj poté musí splňovat minimální podmínku pro tvrdost a zároveň i houževnatost. Hodnoty tvrdosti by se měly pohybovat v rozmezí $HRC = 45 - 52$ a pevnost $R_m = 1600 - 1800 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$. Zvětšená hodnota šířky řezu zapříčiní prodloužení doby bříty nástroje v záběru, čímž bude značně růst teplotní namáhání. Šířka řezu a_e by tedy neměla přesahovat 5 – 10 % průměru nástroje. Vedle fyzikálních a mechanických vlastností se po nástrojích požaduje také geometrická přesnost a homogenost struktury. Trvanlivost bříty se snažíme prodloužit nejčastěji pomocí PVD povlaku. Využíváme především TiCN kvůli vysoké termické stabilitě a TiAlN pro zlepšení odolnosti proti opotřebení. Řezná geometrie nejvíce sleduje předpokládaný směr odchodu třísky.⁴

- HSM (High Speed Machining) – vysokorychlostní obrábění

Podstatou této technologie je využití vysokých otáček vřetene a posuvů. Tyto hodnoty jsou daleko vyšší, než se běžně v praxi využívají. Nejedná se ovšem pouze o tyto dva parametry. Pro to, abychom mohli mluvit o HSM, musíme splnit několik různých požadavků. Jejich zavedení poté vede ke zvýšení produktivity, hladkému povrchu a zkrácení výrobních časů. Aby proces obrábění byl co nejstabilnější, využívá se maximálních otáček vřetene, jejichž frekvence záběru zubů nástroje odpovídá anebo překračuje vlastní frekvenci nejpružnějších částí nástroje. Jedná se tedy o metodu využívající předpokladu, že hlavním zdrojem samobuzených kmitů při obrábění, je obnovovaná vlnitost povrchu. Ta se objeví pokaždé, když se zub nástroje setkává s vlnitostí vytvořenou předešlým zubem. Pro co největší stabilitu se tedy snažíme aplikovat fázové poměry, ve kterých vibrace mizí.¹⁵

Samotná aplikace si vyžaduje využití otáček vřetene v rozmezí 15 000 až 50 000 za minutu. Nástroje by se měly vyznačovat vysokou houževnatostí, odolností proti otěru, dobrým odvodem tepla, vysokou tuhostí a odolností proti teplotnímu šoku. Z toho důvodu se například u vyměnitelných břitových destiček ze slinutého karbidu nachází vyšší procento kobaltu, který nám jako pojivo zajišťuje větší houževnatost. Pro vysokou tepelnou odolnost využíváme PVD povlaky z TiAlN. U upínání nástroje se klade vysoký důraz na házivost. Ta by rozhodně neměla přesáhnout hodnotu 10 mikrometrů. Při každých dalších 10 μm navíc nám klesá životnost nástroje až o 50 %.¹⁵

Využití této metoda nachází především v oblasti automobilového průmyslu při výrobě hliníkových dílů a v medicínském a leteckém průmyslu. Využívá se při výrobě forem a zápusťek, u kterých vyžadujeme vysokou přesnost a kvalitu povrchu anebo také pro obrábění různých neželezných kovů a exotických materiálů.¹⁵

- HPC (High Performance/Productive Cutting) – vysokovýkonné obrábění

Tato metoda obrábění je založena na velkých úběrech třísky. Nejčastěji se tedy s touto strategií můžeme setkat při hrubovacích operacích nebo při obrábění těžko obrobitelných materiálů. Aby byla hloubka řezu považována za velkou, měla by být alespoň 1,5D. Jednou z nejdůležitějších podmínek pro správnou funkčnost této metody je dodržení pravidel ohledně soustavy stroj-nástroje-obrobek.¹⁶

Nástroj vyžaduje vysokou teplotní odolnost. Tato vlastnost je nejčastěji zajištěna pomocí povlaku z TiAlN. Ve většině případů jsou využívány řezné nástroje s vyměnitelnými břitovými destičkami ze slinutých karbidů.¹⁶

Na stroj jsou kladeny největší nároky, které poté mají rozhodující vliv na cenu zakázky. Nejčastěji pracujeme se suchým obráběním kvůli větší ekologičnosti a úspoře nákladů. Nejen, že je nutné kapalinu nakoupit, ale také je potřeba ji posléze zbavit nečistot a ekologicky zlikvidovat. Kromě toho se tato metoda vyznačuje vysokou spotřebou procesní kapaliny, která se nachází na úrovni 16–17 % celkových výrobních nákladů. U stroje jsou také kladeny vysoké požadavky na automatizaci.¹⁶

U obrobku tato metoda na rozdíl od HSC nejčastěji obrábí dvourozměrné tvary. Využívá se také u sériových výrob. Požadujeme rovněž, aby dominantními časy byly časy strojní. Vedlejší časy jsme sice v dnešní době schopni minimalizovat, například použitím sdružených nástrojů, stále by ovšem měly patřit k zanedbatelným časům. V tu chvíli si můžeme být jisti, že bude mít výrazné zvýšení řezné a posuvové rychlosti největší vliv.¹⁶

- HFC (High Feed Cutting) – obrábění za vysokých posuvových rychlostí

Metoda HFC využívá vysokých posuvových rychlostí pro zajištění ekologických a ekonomických přínosů. Hodnota posuvu na zub frézy se může dostat až na 3 mm. Zároveň jsou využívány menší hloubky řezu a je snaha o menší záběry na jednotlivé zuby. Řezné síly jsou směřovány v axiálním směru do vřetene stroje. Tím je zajištěna větší stabilita a redukce vibrací. Snížením radiální složky síly můžeme využívat frézy s délkou až 7D. Díky sníženému výskytu vibrací si můžeme dovolit tedy i velká vyložení nástroje a zvětšuje se životnost nástroje. Také se provádí odlehčení upínací části nástroje pro zamezení kontaktu stopky s obrobkem při provádění hrubovacích operací. Celkově tato metoda vytváří velmi kvalitní povrch s malou tolerancí. To má za následek zkrácení výrobního času, možnost vyloučení polodokončovacích operací a nutnost pouze dokončit výsledný povrch.^{16, 17}

Jednomu ze základních mechanismů celé metody se říká „chip thinning effect“. Často je tento efekt zaměňován s posuvem na zub f_z . To ovšem není úplně pravda. Tento efekt odkazuje přímo na aktuální tloušťku každé třísky oddělené zubem nástroje. Měří se v největším průřezu třísky. Při naklonění nástroje nebo vyměnitelné břitové destičky na 90° se nedočkáme žádného zlepšení. Pokud budeme využívat posuv 0,2 mm na zub, tak výsledná tloušťka třísky bude také 0,2 mm. Při využití úhlu 45° je ovšem již znát rozdíl. Při posuvu 0,25 mm na zub se nám změní tloušťka třísky na 0,178 mm. U úhlu 15° – 17° a posuvu 1,27 mm na zub je tloušťka třísky pouze 0,178 mm. Za stejný čas tedy zvládneme obrábět stejnou plochu, ale při působení velice nízkých řezných sil na nástroj.^{18, 19}

- HRRM (High Removal Rate Machining) – obrábění za velkého úběru.
- Existují zde další podobné technologie, které je možné navzájem kombinovat.

2.6 Eliminace vibrací nástroje

Vibrace nám při obrábění vytvářejí různé problémy. Nejčastěji dochází ke snížení kvality povrchu, nižší životnosti nástrojů, menší tvarové přesnosti, poškození obráběcích strojů a snížení efektivnosti procesu. Obrábění vnitřních tvarových ploch anebo další různé operace vyžadují větší vyložení nástroje, což má za následek zvýšený výskyt vibrací. Většina progresivních technologií a strategií vyžaduje eliminaci vibrací pro jejich úspěšné zavedení do výroby. Abychom nebyli nuceni snižovat produktivitu, například omezením řezných podmínek, snaží se v dnešní společnosti vyvíjet technologie, které usilují o minimalizaci

výskytu, popřípadě škod způsobených vibracemi. Jedním z těchto způsobů je využití pasivně-dynamických systémů.

Pasivně-dynamické systémy využívají principu laděného hmotového tlumení. To má za následek absorpci vibrací, které jsou pohlceny před proniknutím do nástroje. U běžného držáku začne na nástroj působit řezná síla F_e , která způsobí vznik vibrací. Ty se poté rozšíří až ke vřetenu stroje.²⁰



Obrázek 15 – Upínací systém bez pasivně-dynamického systému pro tlumení vibrací²⁰

Pasivně-dynamické tlumení vibrací se především soustředí na přední část držáku. Základní premisou je absorpce na pracovní části a tím zamezení šíření vibrací do držáku. Samotný tlumič se skládá z materiálu, který se vyznačuje vysokou hustotou pro minimalizaci rozměrů. Tlumič využívá radiálních absorpčních prvků, které se nacházejí uvnitř nástroje.²⁰



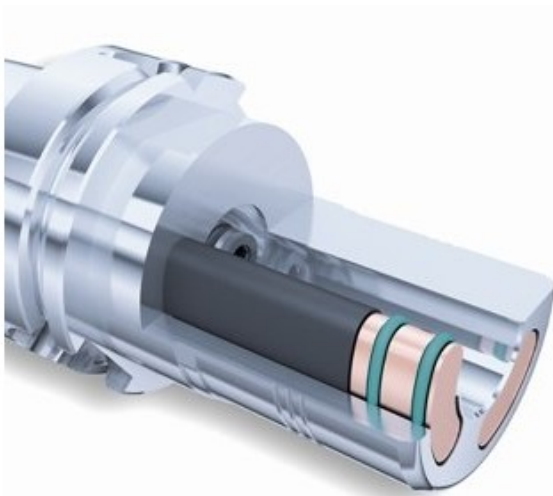
Obrázek 16 - Upínací systém využívající pasivně-dynamického systému pro tlumení vibrací²⁰

Při využití těchto systémů lze provádět obrábění s vyložením až 10x větším, než je průměr držáku. Také jsme schopni dosáhnout až dvojnásobné rychlosti provádění operací s velkým vyložením nástroje. Tento systém tlumení vibrací je velmi prospěšný ve všech průmyslových odvětvích, kde je potřeba vyrábět velké a tvarově složité díly. Jsme tak schopni efektivněji obrábět těžkoobrobitelné materiály a vysokolegované slitiny, při kterých se vytváří velké řezné síly.²⁰

Další možností, jak zamezit vibracím, je využití speciálních upínacích systémů. Ty se snaží využívat různá média nebo mechanismy, které mají pozitivní vliv na jejich absorpci. Můžeme se tedy bavit například o upínacích systémech založených na kapalinách, pevných látkách, teplotní roztažnosti a podobně.

- Polygonální upnutí systémem Tribos

Tribos je systém polygonálního upínání nástroje. Upínací otvor má polygonální tvar. Při působení vnější síly se otvor deformuje a poté je možné zasunout stopku nástroje do kruhového otvoru. Jakmile vnější síly přestanou působit, upínací otvor se navrátí do normálního stavu. Tím je zajištěno velice tuhé a bezpečné upnutí. Tyto upínače poté mohou nabývat různých polygonálních tvaru a verzí.²¹

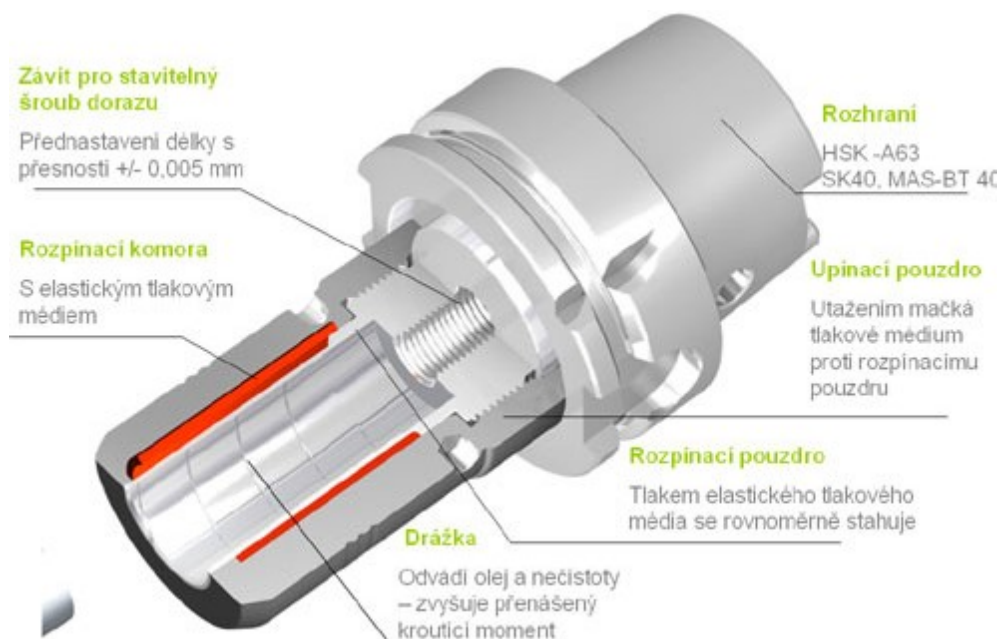


Obrázek 17 – Polygonální upínací systém Tribos patentovaný firmou Schunk²¹

Výměna nástroje je provedena pomocí speciálního hydraulického zařízení a zabere zhruba 20 vteřin. Na rozdíl od tepelných upínačů, zde nedochází k únavě materiálu. Také zahřívání a ochlazování zabere méně času. Dlouhodobější testy potvrdily neměnnost obvodové hřízivosti i krouticího momentu, a to i po 5 000 upínacích cyklech. Nejmenší možný průměr nástroje, který je možný upnout tímto systémem, je 0,3 mm. Jelikož je vhodný i pro vysokorychlostní obrábění, tak je schopen snést otáčky až do 50 000 min⁻¹. Díky rotačně symetrické konstrukci je tento systém velmi dobře vyvážený. Sériový stupeň vyvážení u standardních upínačů Tribos je 2,5 G při otáčkách 25 000 min⁻¹. Polygonální upínače třídy R jsou konturovány s krycí vložkou v dutých komorách. Tím je zajištěna velká radiální tuhost a tlumení vibrací.²¹

- Univerzální upínač Sino

Systém upínání pomocí Sino upínačů je v mnohém podobný hydraulickému upínání. V tomto případě ovšem nepracujeme s kapalinou, ale využíváme deformační segmenty. Ty jsou nejčastěji vyrobeny z tvrdých elastomerů.^{5, 22}



Obrázek 18 – Schéma univerzálního upínače Sino²³

Pouzdro se rovnoměrně stahuje ve směru osy rotace celého upínacího systému. Děje se tak působením tlakové síly elastického média. Tlak vznikne dotahováním šroubu v axiálním směru.²³

Vzniká tak velice přesné a tuhé spojení. Obvodové házení nabývá hodnot do 0,005 mm. Stahování držáku se provádí rovnoměrně, proto je držák také dobře vyvážen. Při otáčkách $15\,000\text{ min}^{-1}$ je hodnota vyvážení G6,3. Pokud se bude jednat o vysokorychlostní obrábění, je tento upínací systém schopen přenášet otáčky až do $42\,000\text{ min}^{-1}$. Samotné elastické medium má ještě jednu pozitivní vlastnost, a tou je schopnost pohlcování vibrací.²³

- **Hydraulické upínače**

Jedná se o další způsob upínání založený na deformaci vnitřního pouzdra. Při zvyšování tlaku kapalného média dojde k upnutí stopky nástroje. Hydraulické upínače podléhají omezením na provozní teplotu, která by neměla přesáhnout 50°C . Kapalně médium má schopnost pohltit a zamezit šíření vibrací. Mezi nejznámější představitele hydraulických upínačů patří Tendo od firmy Schunk a HydroGrip od firmy Sandvik Coromant.²⁴

Řada Tendo využívá dotahování šroubu pro navýšování tlaku procesního média. Samotné pouzdro má několik drážek, do nichž se při upínání nástroje vytlačí veškeré nečistoty. Tímto způsobem je zajištěno ještě přesnější upnutí nástroje. Pokud je potřeba upnout jiný průměr nástroje je možné upravit držák pomocí vložky. Obvodová házivost dosahuje hodnot 0,003 mm a vyvážení při $25\,000\text{ min}^{-1}$ je G2,5. Díky udržení stejných upínacích sil i při zvýšených otáčkách je možné tento systém využít pro HSC obrábění.²⁴



Obrázek 19 – Hydraulické upínání firmy Schunk řady Tendo ²⁴

Samosvorné upínače HydroGrip pracují podobně jen s jedním významným rozdílem. Upnutí nástroje je provedeno samosvorným klínem. Na ten je potřeba využít externí zdroj tlakové kapaliny. Pro upnutí se využívá tlak o hodnotách 500 barů a pro uvolnění až 800 barů. Jsou schopny přivádět řeznou kapalinu vnitřkem nástroje a také být využívány pro HSC obrábění. Maximální hodnota házivosti je v rozmezí 0,002–0,005 mm. Standardně je tento systém upínání vyvažován na G2,5 pro maximální otáčky dané velikosti držáku. ²⁴

- Tepelné upínače

Tepelné upínače nevyužívají žádné přídavné upínací elementy. Upnutí je provedeno pouze pomocí přilehlé plochy. Ta se nahřeje a vloží se do ní stopka nástroje. Poté se držák ochladí a vlivem smrštění materiálu vzniká spoj. Obvodové házení má přesnost v rozsahu 0,003 mm. Tyto hodnoty ovšem nabývají pouze velice kvalitní tepelné upínače. Největším výrobcem systémů tepelného upínání je firma Haimer. ²⁵

Velkou výhodou tohoto systému je možnost optimalizace. Pokud je potřeba extrémně vysokých hodnot tuhosti a upínací síly, například z důvodů aplikace pro těžkoobrobitelné obrábění, lze držák vyrobit se zesílenými stěnami. Naopak při obrábění hlubokých dutin lze držák vyrobit velice štíhlý. Dále je možné využít prodloužení, a to dokonce několika současně. ²⁵



Obrázek 20 – Tepelné upínání s několika prodlouženími současně ²⁵

Upnutí je potřeba provést pomocí nových a kvalitních přístrojů. Pokud přístroj pro tepelné upínání není dostatečně výkonný, dojde k nedostatečnému prohřátí držáku. Tím se prodlouží doba na to, aby se držák dostatečně nahřál, a tedy i celá doba výměny nástroje. Výměna poté trvá okolo 30 vteřin. Během této doby musí dojít k nahřátí držáku, vložení nástroje a opětovnému ochlazení.²⁵

3 Experimentální část

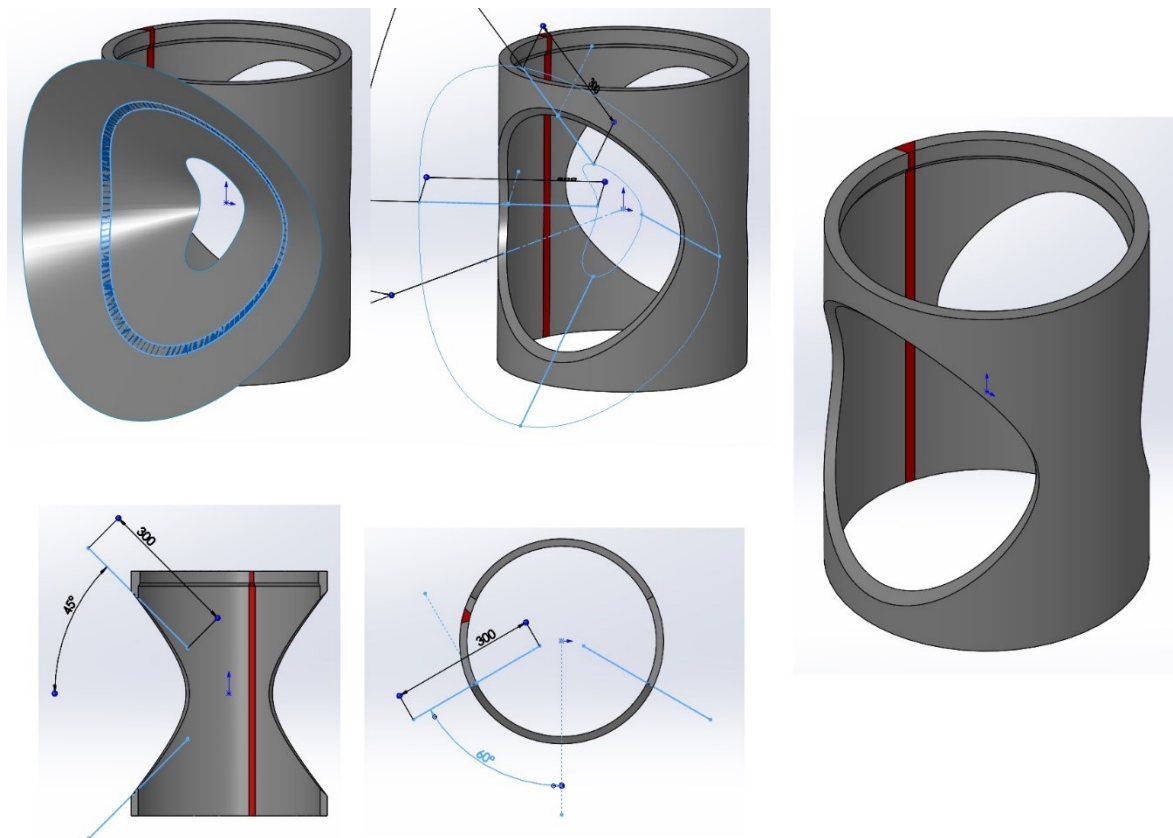
3.1 Úvod

V posledních letech je ve strojírenství snaha o zpřesňování, zrychlování a zlevňování výrobního procesu s maximálním ohledem na dodržení kvalitativních standardů. V nejideálnějším případě jsou všechny tyto požadavky v rovnováze a vytvořeny přímo na míru pro daný výrobek a provoz. Pokud by nejefektivnější výroba byla například pomocí nekonvenčních metod obrábění, ale firma by nedisponovala takovými možnostmi výroby, nejlepším řešením by bylo zvolit jinou možnou strategii výroby. Díky tomu není potřeba nakupovat drahé strojní vybavení a dojde tak ke zlevnění výroby součástí. V dnešní době se tak dostává k velkému uplatňování progresivních technologií, které využívají již stávající stroje a nástroje. Nevylučuje to ovšem ani velký posun technologií ve výrobě pomocí nekonvenčních metod obrábění.²⁶

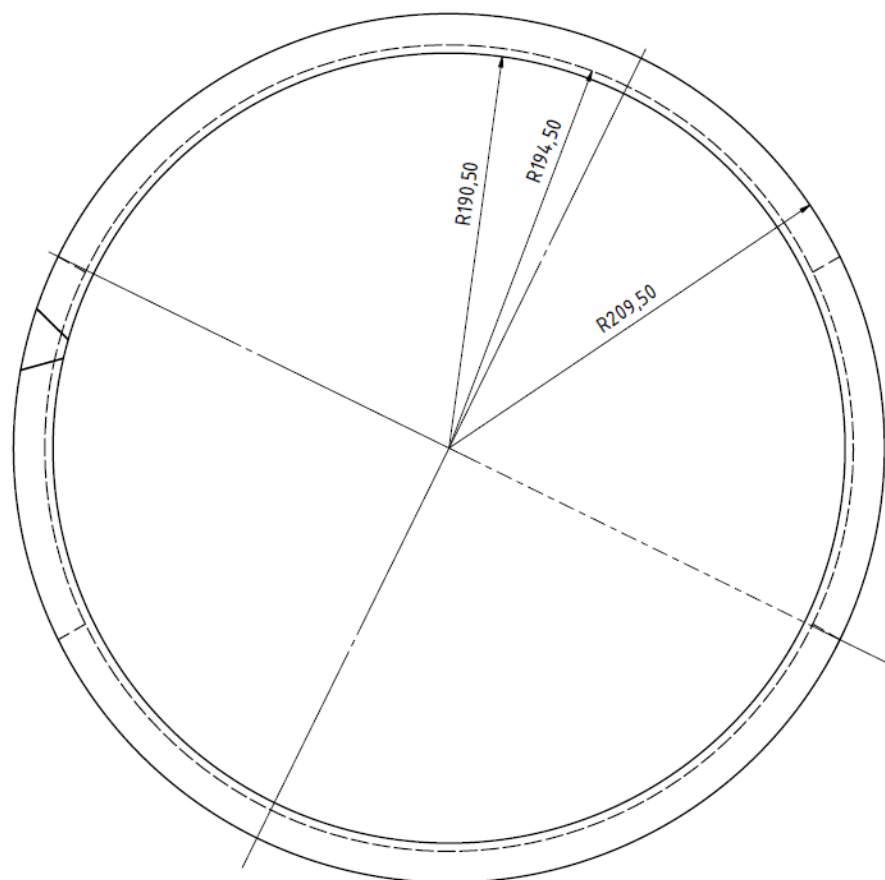
Hlavním cílem experimentu je návrh takové kombinace technologií, aby byl vytvořen co nejefektivnější způsob výroby tvarové části nového druhu středotlakých šoupátek. V současnosti jsou využívána šoupátka svařovaná, litá a kovaná. Svařovaná šoupátka jsou velmi lehká a cenově dostupná. Nedosahují ovšem tak velké bezpečnosti, aby je bylo možné využít pro vysoké tlaky, proto se tato šoupátka využívají pouze jako nízkotlaká. Litá šoupátka jsou lehká a levná a lze je využít jako středotlaká, i když nemají moc velkou bezpečnost. Nejbezpečnějším a zároveň i nejdražším provedením středotlakých šoupátek je při využití kování. Nový druh středotlakých šoupátek by tedy měl být nejprve tvářen a tím získat vysokou bezpečnost. Poté by měl být svařován, čímž by se docílilo levnějšího a lehčího spoje.²⁶

Experiment se tedy zaměřuje na problematiku výroby průniku ploch a jejich tvarové části před svařováním. Výsledné středotlaké šoupátko by mělo podléhat bezpečnostním kritériím potřebným pro uplatnění v jaderné energetice. Jejich bezpečnost musí být zaručena na 60 let. Při volbě vhodných způsobů výroby je nutné také přihlížet k přesnosti ustavení průníků ploch. Požadovaná drsnost pro obrobené svarové spoje je $Ra\ 12,5\ \mu m$. Konečné rozměry tělesa šoupátka jsou $\varnothing D = 419\ mm$, délky $L = 520\ mm$.²⁶

Cílem této části práce by měl být návrh co nejefektivnější výroby tvarových částí průníků ploch, která bude splňovat veškeré potřebné požadavky. Tato výroba musí být vytvořena speciálně pro daný typ provozu a jeho výrobní možnosti. Výsledkem bude středotlaké šoupátko ze skruženého polotovaru, které bude následně svařeno a obráběno.²⁶



Obrázek 21 – Grafické vyobrazení části tělesa šoupátka ²⁶



Obrázek 22 – Tloušťky stěn těla šoupátka ²⁶

3.2 Návrh výroby tvarové části průníků ploch

Návrh technologického řešení výroby tvarových částí průníků ploch jsem rozdělil na 2 části. První část řeší problematiku předhrubování průníků ploch. V této části jsem se snažil navrhnout takové možné strategie, které by vyrobily průniky ploch co nejlépe a co nejrychleji s ohledem na svařovanou konstrukci. Obdobně jsem poté navrhoval druhou část týkající se samotné výroby tvarových ploch.

3.2.1 Předhrubování průníků ploch

- 5-osé obrábění

Technologie obrábění materiálu, při kterém je možné se pohybovat až v pěti osách zároveň, pokud to vyžaduje složitost operace. Proces obrábění je plně automatizovaný i s možnostmi výměn nástroje. Díky tomu může být tato metoda využita i při sériové výrobě.

Teplo vytvořené nástrojem na povrchu při utváření třísky nedosahuje příliš vysokých hodnot. Pokud by byly využity různé progresivní strategie obrábění, při kterých odchází většina tepla v třísku, nemělo by dojít k vysokému tepelnému ovlivnění obráběného materiálu. Tím můžeme zaručit minimální možnost výskytu deformace a možné nesouososti průníků ploch na svařované konstrukci. Pokud by se výsledné tvarové plochy vyráběly pomocí víceosého obrábění, byli bychom schopni celou výrobu provést s využitím jednoho stroje. Na jedno ustavení obrobku by bylo tak možné předhrubovat průnik ploch a vyrobit tvarové plochy na nich. Ušetřil by se tak čas i celkové náklady na výrobu.

- Řezání autogenem

Jedná se o jednu z nejstarších technologií pro řezání kovů a plechů. Využívá se při ní hořícího plynu, nejčastěji směs kyslíku a acetyleny, lze ovšem využít také etylen nebo propan. Řezání autogenem je nejčastěji využíváno spíše pro řezání vysokouhlíkových ocelí a dosahujeme u něj teplot v rozsahu od 1 150 do 1 350 °C. To může být velkým problémem pro svařovanou konstrukci.

Řezání by se neodehrávalo v bezprostřední blízkosti svaru, a tudíž by nedošlo k metalurgickému ovlivnění v teplotně ovlivněné oblasti svaru. Samotné skružení a svařování nám ovšem vnese do materiálu zbytkovou napjatost. Při využití takto drastické tepelné metody by mohlo dojít k jejímu uvolnění a možným deformacím. To je samozřejmě zcela nežádoucí a měli bychom se tomu snažit vyhnout s ohledem na nutnost souososti průníků ploch. Pokud bych tuto metodu zvolil pro výrobu, rozhodně bych uvažoval nad možnostmi uplatnění tepelného zpracování.

- Řezání plazmou

Plazma a ionizované plyny vznikají mezi řezaným materiálem a netavící se elektrodou. K tomu dochází v řezacím plynu, kterým prochází proud elektronů. Jako řezací plyn se

využívá kyslík nebo směs argonu a vodíku. U této metody doporučuji využít hořák s transferovým obloukem, který je vhodný pro řezání ocelí a neželezných kovů. Při použití vířivého plynu, který by usměrnil plazmový oblouk, by bylo dosaženo vysoké přesnosti. Ve srovnání s řezáním plynem je tato metoda časově úspornější.

Plazma za sebou zanechává povrch s rýhami, a celkově tak velkou drsností. Jedná se ovšem o předhrubování operaci, a tudíž to není velký problém. Teplota využívaná touto metodou je vysoká obdobně jako u řezání autogenem. Teplotně ovlivněná vrstva se pohybuje v rozmezí od 0,25 do 1,25 mm. Není tedy tak velká, stále ovšem může přetrvávat problém s uvolňováním zbytkových napětí a tím docházet k deformaci materiálu.

- Řezání laserem

K řezání dochází v kombinaci laserového paprsku a exotermické reakce reaktivního plynu na rozžhaveném povrchu. Dochází tak k velice rychlému a produktivnímu řezání materiálu. Pro řezání větších tlouštěk korozivzdorné oceli je třeba využít dostatečně výkonný laser.

Řez je velice úzký a drsnost povrchu se pohybuje v rozmezí Ra 3,6 až 12. Teplotně ovlivněná oblast a celkové mechanické působení na řezaný materiál je téměř zanedbatelné. To nám zamezuje vzniku nežádoucích deformací. Laser nám umožňuje využít vysokou automatizaci výroby a tím je vhodný i pro sériovou výrobu.

- Řezání vodou

Tato metoda využívá paprsek vysokotlaké vody s příměsí abraziv k oddělování materiálu. Při řezání vodou se musíme vyvarovat zpracovávání materiálů, které mohou být znehodnoceny vodou. To by však při řezání korozivzdorné oceli v rámci tohoto experimentu nemělo představovat problém.

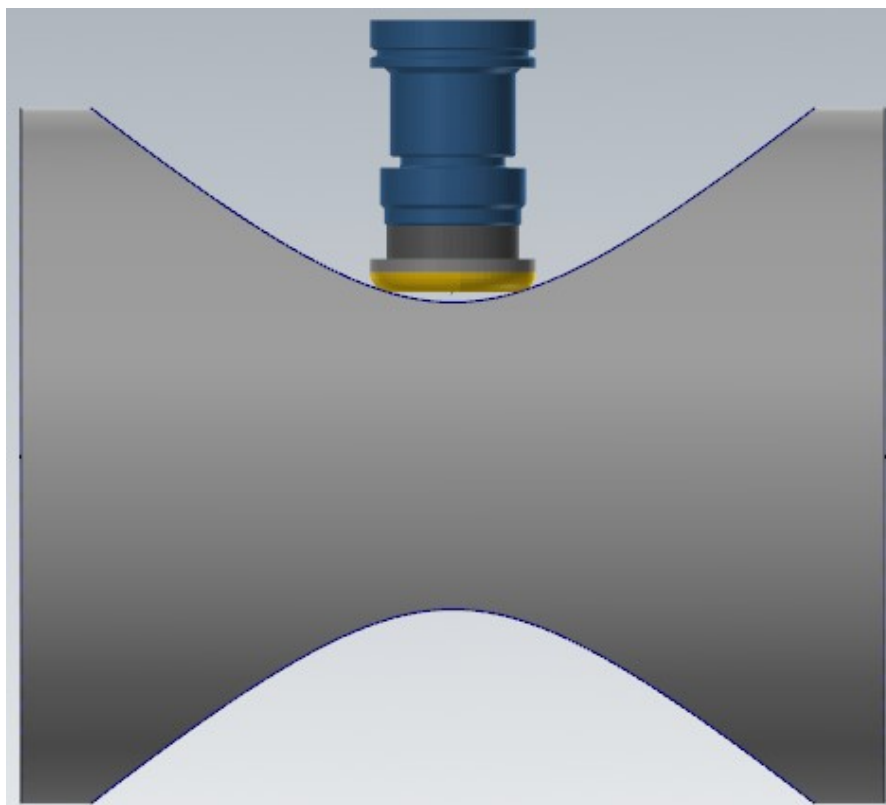
Řez vodou je relativně chladný, a tak lze říct, že nezpůsobuje žádná teplotní ovlivnění na řezaný materiál. Taktéž nedochází k vytváření zbytkového napětí, mikrotrhlin nebo mechanické deformaci. Drsnost se pohybuje rozsahu od Ra 2,5 do 12 μm . Hodnota drsnosti povrchu je jiná na vstupu a výstupu paprsku vody. U výstupu paprsku ven z materiálu je velký výskyt rýh a celkové zhoršení drsnosti povrchu. Při rychlejším řezu nebo při řezu hůře obrobitelným materiálem může dojít k vzniku úkosu. Paprsek totiž nestihne plně prořezat materiál až dolů, a dodržet tak konstantní průřez. Proces řezání je automatizovaný a lze ho využít pro sériovou výrobu. Pokud by výroba tvarových ploch byla prováděna pomocí vodního paprsku, byla by celá výroba kusu provedena na jednom stroji. Tím by se mohli podstatně snížit náklady na převoz a zkrátit výrobní časy spojené s ustavováním a přípravou stroje.

3.2.2 Výroba tvarových částí průniků ploch

Výrobu tvarových ploch po předhrubování průniků lze provést několika způsoby. Navrhl jsem tedy tři možnosti, jak tuto operaci provést. V rámci teoretického návrhu jsem rozepsal možnosti výroby 3-osým a 5-osým obráběním a pomocí vodního paprsku.

Pokud jsou tvarové plochy obráběny, nejčastěji se samotný proces výroby skládá z hrubovacích, předdokončovací a dokončovací operací. Tyto úseky sledu operací pak mají svoje vlastní dokončovací operace, které se řeší především u zvláště tvarově složitých a těžko vyrobitelných součástí. Nástroj totiž nemusí být vždy schopen odebrat všechnen materiál, který je potřeba obrobit při dané operaci.

Tého problém se vyskytuje i při 3-osém hrubování tvarových částí průniků ploch. Přesněji se jedná o rádius o velikosti $R = 105 \text{ mm}$. Standardně se na tuto operaci využívá toroidní fréza s rádiusem v rohu o průměru v rozmezí 80 až 200 mm a rádius vyměnitelných břitových destiček $R 6$ až 20 mm . Čím větší bude průměr nástroje a menší rádius břitových destiček, tím větší neobrobená plocha nám vznikne.

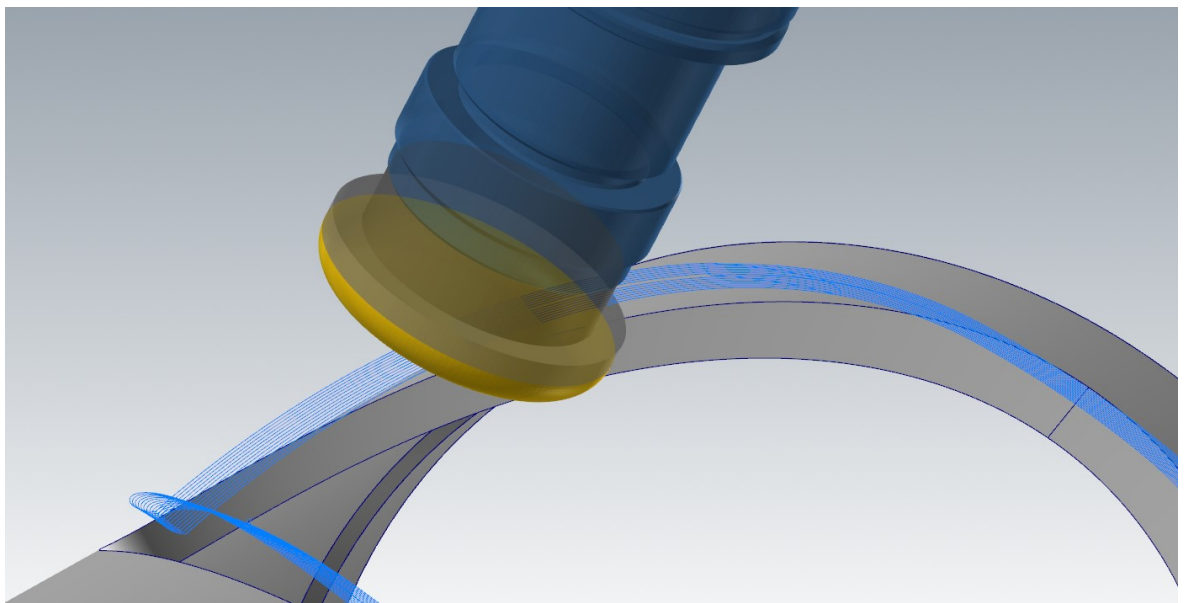


Obrázek 23 – Problematika neobrobené plochy při 3-osém hrubování

Pokud by byl využit nástroj s menším průměrem, bylo by možné se tomuto problému vyhnout. To by ovšem bylo vysoce neproduktivní a mnohem lepší variantou je dodělat zbylou plochu při dokončovací operaci.

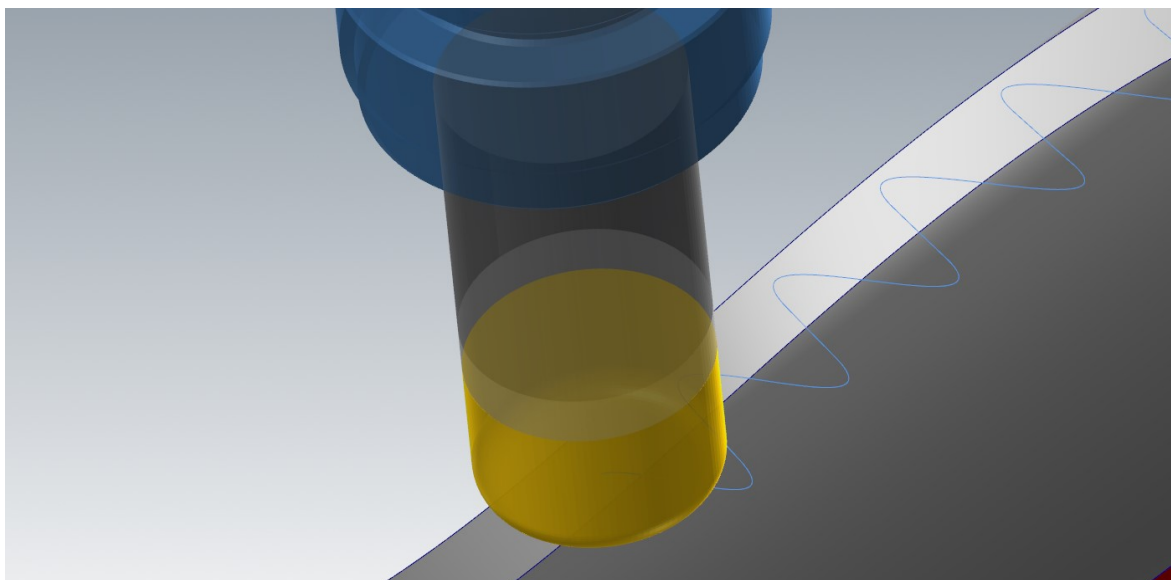
- 3-osé obrábění

Hrubovací operace by byla provedena pomocí běžného 3-osého obrábění toroidní frézou s rádiusy v rohu, která využívá vyměnitelné břitové destičky. Pro nejlepší možné provedení navrhuji využít průměr nástroje od 80 do maximálních 160 mm. Zaoblení rádiusů břitových destiček by mělo být v rozmezí od R 6 do 20 mm. Pro zajištění co největší přesnosti by měla hodnota tloušťky ubraného materiálu odpovídat stále stejné velikosti. Odhadovaný obráběcí čas při využití výše uvedených rozmezí průměrů a zaoblení by měl být od 120 do 180 min. K tomuto času by se poté musely přidat další časy, abychom dostali celkovou délku operace. Tedy takový čas, který zahrnuje celý výrobní proces i s upínáním obrobku a podobně. Samozřejmě tento obráběcí čas se vztahuje pouze k hrubovací operaci. Soustava pro upnutí nástrojů by měla splňovat minimální hodnoty házivosti a schopnost tlumení vibrací. Jelikož se obrobek neskládá z hlubokých kapes či děr, není potřeba, aby nástroje byly příliš dlouhé. Při využití kratších nástrojů je možné minimalizovat možnost vzniku samobuzeného chvění a razantně zvýšit efektivnost výroby. Při využití PVD povlaků typu TiAlN, TiAl nebo AlCrN se razantně zlepši odolnost proti opotřebení. Povlak z TiCN zase zajistí zvýšení termické stability a tím se prodlouží trvanlivost břitu. Nebude tedy nutné tak často vyměňovat nástroj a tím se ještě více ušetří čas nutný pro výrobu součástí.

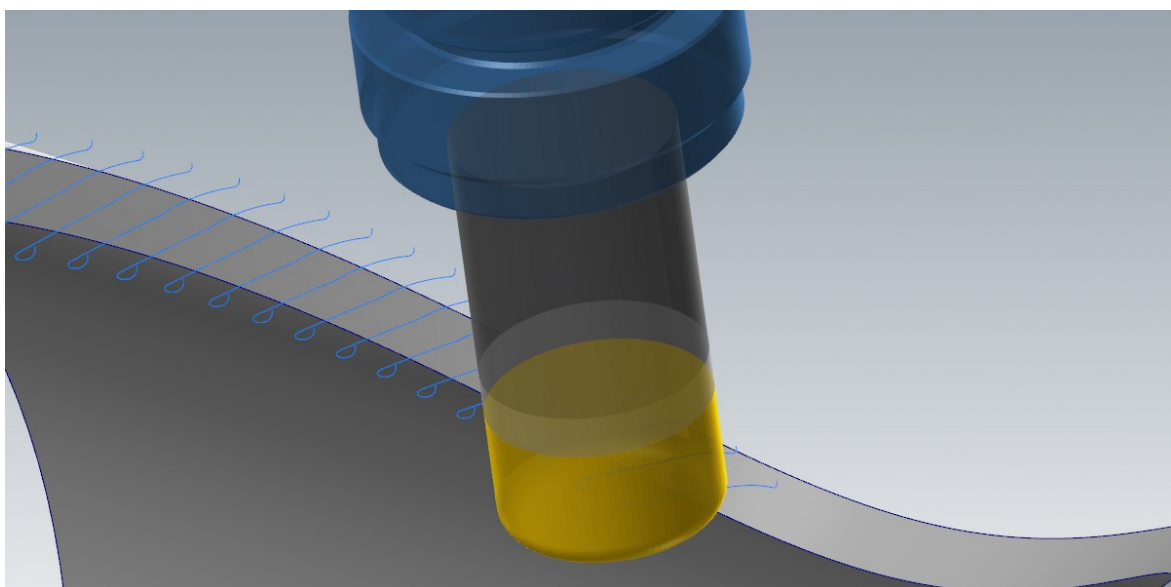


Obrázek 24 – 3-osé hrubování tvarové plochy

Pokud chceme dokončovat plochu, jako je tato, pomocí 3-osého obrábění, nabízí se strategie řádkování a strategie Z-průřezů. Strategie řádkování je využívána na mírně zakřivených plochách a jde o rovnoběžné dráhy nástroje opisující tvar obráběné součásti. Obrábění Z-průřezy je obdobné. Používá se ovšem převážně na vertikální oblasti a více zakřivené plochy.



Obrázek 25 – 3-osé dokončování řádkováním



Obrázek 26 – 3-osé dokončování Z-průřezy

Nejvhodnější ovšem bude možnost využití takzvaného kombinovaného dokončování. Jde o kombinaci strategie vycházející ze spojení Z-řezů a řádkování. Tím, že se tyto dvě základní dokončovací strategie sloučí, vznikne velice efektivní způsob obrábění, který je schopný minimalizovat celkový obráběcí čas. Také je díky němu možné dosáhnout ještě lepšího povrchu a přesnosti výroby.

Pro tuto operaci by měla být využita toroidní fréza s rádiusy v rohu s vyměnitelnými břitovými destičkami. Břítové destičky by měly mít zaoblení rádiusů v rozmezí R 6 až 10 mm. Samotný průměr frézy je potřeba volit od 35 do 55 mm. Odhad doby trvání obráběcího procesu by měl být kratší než u hrubovací operace. Jedná se tedy přibližně o 60 až 90 min při využití navrhovaných parametrů nástroje. Tento čas se opět týká pouze obrábění, a je tedy potřeba jej brát s rezervou. Celkový obráběcí čas i s hrubovací operací by se měl

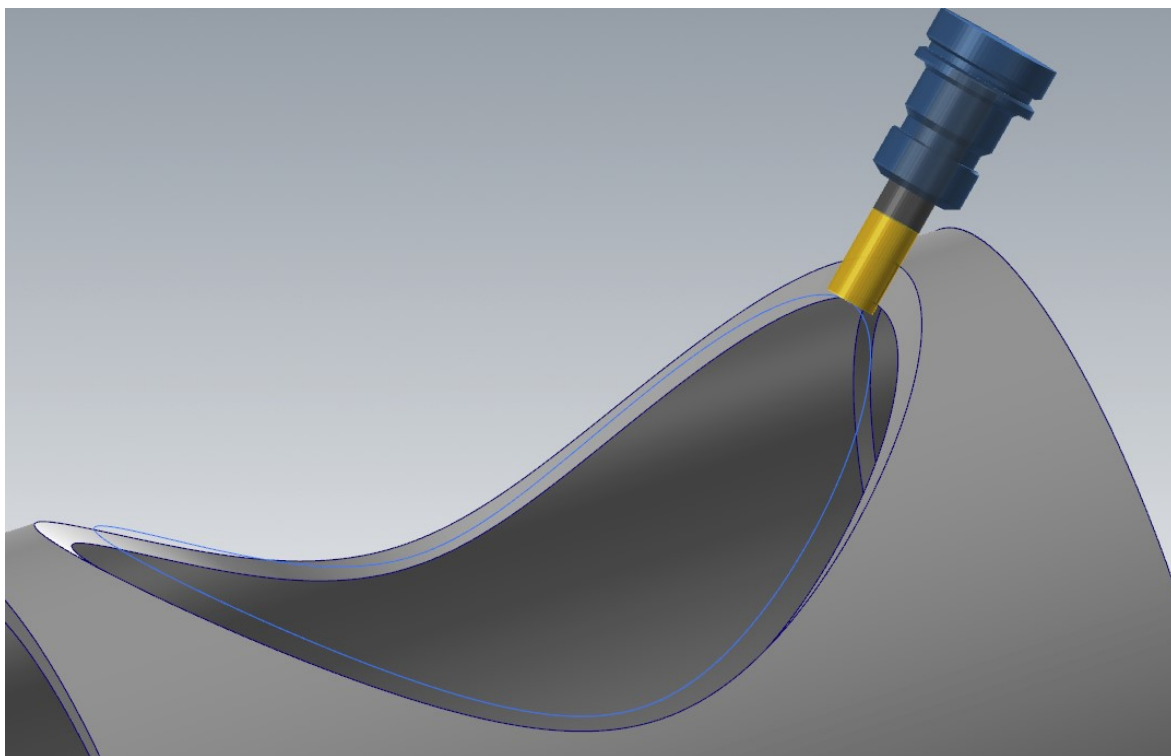
pohybovat od 180 do 270 min. Volba řezných podmínek se liší podle typu frézy a při jejich určování by měla být brána v potaz předdefinovaná rozmezí udávaná výrobcem.

Jelikož se jedná o dokončovací operaci, je třeba se zaměřit především na celkovou přesnost a drsnost povrchu. Proto by měla být samotná operace nastavena tak, aby při ní docházelo k co nejmenším změnám směru a upnutí nástroje zvládlo utlumit většinu vzniklých vibrací. Díky tvaru průniků ploch je možné využít kratších nástrojů a tím ještě snížit riziko vzniku vibrací.

- 5-osé obrábění

Samotné víceosé obrábění bude využito pouze u dokončovací operace. U hrubování se tedy jedná o 3-osé frézování s využitím toroidní frézy s rádiusy v rohu. Doporučuji využít frézy s průměrem 80 a 160 mm s rádiusy R 6 až R 20. Odhadovaný obráběcí čas odpovídá rozmezí 120 až 180 min. Pro zajištění co nejlepšího povrchu by tloušťka odebíraného materiálu měla odpovídat konstantní velikosti a přídavky na obrábění musí být rozděleny rovnoměrně. Tvar obrobku při této operaci nevyžaduje velkou délku nástroje, a jsme tedy schopni ji minimalizovat. S využitím držáků se schopností tlumení vibrací by mělo být riziko na jejich vznik při obrábění značně sníženo. Trvanlivost břitu je možné zvýšit využitím PVD povlaků z TiCN pro vyšší termickou stabilitu a TiAlN pro odolnost proti opotřebení. Možné je také využít například povlaky z AlCrN, TiN nebo TiAlN.

Dokončovací operace je prováděna v pěti osách, a to s využitím celokarbidové frézy. Jelikož se nejedná o dlouhou součást, není potřeba využít stroj pro víceosé obrábění typu hlava-hlava, tedy stroje, kde rotaci i naklápění provádí nástroj. Můžeme využít typ stůl-stůl nebo hlava-stůl, které se vyznačují mnohem větší tuhostí soustavy. Také díky možnosti naklopení a rotace si můžeme dovolit využít kratší těla nástrojů. Bohužel z důvodu typu obráběcího cyklu bude muset být řezná část delší než u 3-osého obrábění. Obrábění je totiž celé realizováno bokem frézy. Průměr celokarbidové frézy navrhuji v rozmezí 20 až 55 mm s 3 až 7 břity. Frézy by měly být vyrobeny anebo povlakovány z materiálů zvyšujících otěruvzdornost pro zvýšení trvanlivosti. Pro zajištění minimálního rizika vzniku vibrací a tím navýšení kvality hotového výrobku a celkové efektivnosti výroby je zapotřebí využít moderních upínačů nástrojů. Tento způsob obrábění zaručí neměnnost směru při obrábění, a bude tak dosažen přesnější a lepší povrch výrobku než u 3-osého obrábění.



Obrázek 27 – 5-osé dokončování tvarové plochy

- Vodní paprsek

Přesněji by se mělo jednat o obrábění abrazivním vodním paprskem (AWJM). Tato technologie je, na rozdíl od čistého vodního paprsku, vhodnější pro tvrdší materiály díky již zmíněným abrazivům. Vodní paprsek nezpůsobuje žádná ovlivnění na řezaném materiálu. Není třeba se tedy obávat, že by mohlo dojít k narušení integrity svaru či vzniku prasklin a trhlin na povrchu vlivem tepelných, chemických či mechanických změn v materiálu.

Kvalitu řezu především ovlivňuje druh abraziva a vzdálenost mezi obrobkem a tryskou. Jako abrazivo doporučuji využít granátový písek nebo olivín. Vzdálenost mezi obrobkem a tryskou je potřeba zvolit co neoptimálněji, aby bylo dosaženo co nejlepší drsnosti. Materiál, který je potřeba obrábět, je vcelku tvrdý, a proto je potřeba, aby výkon čerpadla byl dostačující. Navrhuji, aby se výkon pohyboval alespoň v rozmezí 35 až 40 kW. Při využití stroje schopného náklonu řezací hlavy o 60 ° je možné se vyvarovat zpoždění vodního paprsku a chybě úkosu drážky. Konstrukce a technologické řešení vyžaduje, aby drsnost šoupátka byla na obrobených plochách alespoň Ra 12,5 μm. To může být problém při využití této technologie, jelikož se drsnost povrchu mění na vstupu a výstupu vodního paprsku. Pro dodržení nutných požadavků na výrobek je potřeba výrobu přizpůsobit pro nejvyšší kvalitativní stupeň při obrábění abrazivním vodním paprskem (Q5). Tento stupeň udává nutnou stálost drsnosti jak v horní, tak ve spodní kontuře do Ra 3,2. Tvarová přesnost v obou konturách by měla být minimálně +/- 0,1 mm.

4 Technicko-ekonomické zhodnocení

Při uvažování nad přijmutím zakázky jsou pro firmu jedny z nejdůležitějších faktorů schopnost vyrobit daný produkt a výše výdělku. Tyto dva faktory jsou velmi úzce provázány a nemůžeme je řešit odděleně. Pokud by byla technologie nastavena co nejlépe, mohlo by dojít k přesáhnutí výše nákladů nad prodejní cenu. Naopak při velkém šetření by výrobek mohl být nekvalitní a nedodělaný. Samozřejmě oba tyto extrémy jsou špatné a je potřeba se jim vyvarovat. Je tedy velmi důležité navrhnout výrobu tak, aby byla vhodná pro daný výrobek i provoz. Samotný provoz nám totiž celkově definuje, jakou technologii pro výrobu využijeme. Pokud podnik není dostatečně vybaven stroji, nástroji a dalším potřebným vybavením pro využívání dané technologie, je nemožné ji začlenit do výrobního procesu. I kdyby tedy bylo z hlediska efektivnosti a kvality nejvýhodnější využít technologii, kterou by podnik nedisponoval, nejspíše by využita nebyla. Nákup nového vybavení nebo strojů by s největší pravděpodobností byl příliš nákladný a neoplatil by se. Pokud ovšem pro výrobu je nutné ji i tak využít, je potřeba zvážit, zda do budoucna není vhodné rozšířit své pole působnosti. Dalším důležitým kritériem vedle vybavenosti provozu jsou jeho zaměstnanci. Schopnosti pracovníků jsou nejspíše ta nejdůležitější věc při návrhu a zavedení technologie do výroby. Mnohdy jejich pouhá praktická vzdělanost nemusí být dostačující a je potřeba je novým technologiím naučit. Různé kurzy jsou ovšem vysokým výdajem, se kterým je nutné počítat.

Své návrhy jsem provedl obecně a snažil se v nich zaměřit na co největší oblast. Každá z technologií, kterou jsem navrhl, má své klady i zápory a je možné ji využít v jiných situacích. Pokusím se tedy své návrhy rozebrat tak, abych popsal pole jejich působnosti či možnou vhodnost a nevhodnost pro finální výrobu. Také zkusím nalézt různé alternativní způsoby, které by mohly být v určitých případech ekonomičtější a výhodnější.

4.1 Předhrubovací metody

Mezi metodami pro předhrubování jsem se snažil najít co nejširší škálu technologií, kterými jsme schopni vyrobit dva sousedé průniky ploch. Tato technologie musí být aplikována na skruženou a svařenou korozivzdornou ocel.

Mezi první mé návrhy patří řezání autogenem a plazmou. Obě tyto metody jsou si vcelku podobné, a tak je budu rozebírat současně. Cenově jsou nejlevnějšími možnostmi, jak danou operaci provést. Jejich pořizovací a údržbové náklady nejsou příliš vysoké a spousta provozů již má tyto technologie zavedené do svých výrob. Nejedná se tedy o žádné nové ani převratné technologie, které jsou ovšem stále používány pro jejich širokou využitelnost a cenovou dostupnost. Mnoho pracovníků je s těmito technologiemi již obeznámeno, a tedy zde není problém s nutností zaučení. Obě metody jsou spíše určeny pro řezání nízkolegovaných nebo nelegovaných ocelí a mohl by se zde vyskytnout problém s nemožností aplikace na korozivzdorné oceli. Je zde ovšem i druhý problém, který je mnohem závažnější. Jelikož konstrukce musí být svařovaná, neměla by při výrobě být využita metoda s vysokým

teplotním působením na materiál. Průnik ploch se nachází v dostatečné vzdálenosti od svaru, a tedy by nedošlo k působení na jeho teplotně ovlivněnou oblast. Svařování a skružení materiálu nám ovšem v materiálu zanechává zbytková napětí. Ta se při využití vysoké teploty mohou uvolnit, a deformovat tak materiál. Celkový řez při využití těchto technologií je s vysokou drsností a množstvím rýh. To není zase tak velký problém, pokud vezmeme v potaz, že se jedná o předhrubovací operaci. Řezání autogenem i plazmou jsou tedy nejlevnějšími možnými řešeními pro předhrubování průniků ploch. Při jejich použití se ovšem v našem případě vyskytuje mnoho problémů a nemyslím si, že by jejich realizace byla vhodná.

Další možností je využití laseru jako řezacího prostředku. Jelikož nevytváří vysoké teplo, tak teplotně ovlivněná oblast je velmi malá a vcelku zanedbatelná. To stejné se dá říct o mechanickém působení na řezaný materiál. S využitím CNC řízení lze dosáhnout vysoké produktivity. To nám dává také velké usnadnění při využití laseru pro sériovou výrobu. Největším problémem laseru je jeho nedostačující výkon. Nejlepší možností, jak laserem řezat, je s využitím CO₂ laseru. Abychom byli schopni tímto laserem řezat naši tloušťku materiálu, musel by se výkon rovnat alespoň 6 kW, ne-li více. Tato hodnota je ovšem velmi vysoká a není zcela jednoduché ji dosáhnout. V České republice tak zatím není mnoho firem disponujících takovýmto výkonem laseru. Celkově se ovšem jedná o velmi produktivní metodu s nízkou zátěží na materiál a kvalitním řezem. I tak ale vidím realizaci této metody poněkud obtížně a nejspíše bych se k ní neuchýlil.

Jedna z mých posledních dvou návrhů výroby je využití 5-osého obrábění. Jedná se o vcelku běžnou metodu, kterou disponuje spousta různých podniků. Nutná investice do strojů, nástrojů a ostatních potřebných věcí by byla minimální. Největším nákladem této oblasti výdajů by tedy nejspíše bylo obměňování spotřebních zboží, jako jsou například vyměnitelné břitové destičky. Celkově tato technologie nemá razantní vliv na materiál, a není třeba mít tedy obavy o narušení integrity svaru. Podrobněji se o 5-osém obrábění rozepíšu v následující části této kapitoly věnované dokončování tvarové plochy touto metodou. Využití 5-osého obrábění doporučuji pro finální realizaci předhrubovací operace.

Jako poslední možnost předhrubování průniků tvarových ploch mého šoupátka jsem navrhl technologii řezání vodním paprskem s příměsí abraziv. Díky využívání vody s abrazivou jako prostředku řezání dochází k poměrně chladnému řezu, který nezpůsobuje teplotní ovlivnění řezaného materiálu. Natlakovaný proud vody nezpůsobuje žádné mechanické deformace ani mikrotrhliny. Nemělo by zde tedy existovat riziko uvolnění zbytkových napětí. Velkým problémem této metody je nestálost drsnosti povrchu po celé tloušťce materiálu. Při předhrubovací operaci ovšem tento problém není tak významný a lze jej ignorovat. Řezání vodou je zde již skoro sto let, a dá se tak předpokládat, že spousta firem již disponuje nutnými požadavky pro aplikaci této technologie. Na rozdíl například od obráběcích strojů to ovšem není na všech provozech standardem. Ne všechny firmy si tak mohou dovolit využít tuto technologii bez nutné investice do veškerých potřebných zařízení

a zajištění proškolených zaměstnanců. Více tuto technologii rozeberu v následující části kapitoly při uvažování nad možným využitím vodního paprsku pro finální dokončení výrobku. Společně s 5-osým obráběním je tato možnost nejvhodnější pro konečnou realizaci při výrobě šoupátka.

Možnou alternativou těchto návrhů je využití firem, které se na řezání danou technologií zaměřují. Pokud by firma provádějící zakázku nedisponovala těmito technologiemi a chtěla by jich využít, mohla by zaplatit jinému výrobcí za jejich realizaci. Je zde ovšem podmínka maximální ceny takovéto zakázky. Kdyby hodnota produktu přesáhla možný zisk na jeho prodej, logicky by nevznikl žádný výdělek. Je zde také nutné počítat s tím, že musí být zajištěna doprava do firmy a z firmy provádějící předhrubovací operaci. To samé platí pro uskladnění výsledných polotovarů pro následné dokončení tvarových částí. Je to tedy logisticky mnohem nákladnější a složitější, než když je provedeno vše na jednom provozu. Také vzniká riziko nedodání dodávky včas, což by ohrozilo termín předání finálního výrobku zákazníkovi.

4.2 Dokončovací metody

Po dokončení výroby souosých průníků ploch je potřeba na nich udělat tvarové plochy. Tato konečná fáze výroby šoupátka je rozdělena do dvou částí, a to na hrubování a dokončování tvaru.

Hrubovací operace jsou při výrobě na obráběcích centrech stejné, a jde přesněji o 3-osé obrábění. Jedná se o již starší a zaběhnutou metodu obrábění. Pro co největší efektivnost je ovšem potřeba využít nové nástroje a upínací systémy. Při aplikaci povlaků, jako jsou například TiAlN, TiAl, AlCrN nebo TiCN, můžeme zlepšit odolnost proti opotřebení a termickou odolnost. Je nutné počítat s vyšší cenou za jednotlivé břitové destičky, což je ovšem kompenzováno daleko menší potřebou vyměňovat opotřeбенé plátky. Nejen, že tak snížíme obráběcí čas díky menší nutnosti zastavování programu, ale také je celkově spotřebováno méně destiček. Mimo jiné je tím také zajištěna větší bezpečnost celkového obráběcího procesu. Tato metoda má ovšem jeden velký problém. Při její realizaci dochází k neobrobení plochy, kvůli většímu rádiusu frézy viz. Obrázek 23. Proto je nutné tuto plochu doobrobit při dokončování tvarové plochy.

První návrh dokončení tvarových ploch je při využití 3-osého obrábění, tedy se jedná o stejnou technologii jako u hrubování. Díky tomu jsme schopni vyrobit celou předhrubovanou tvarovou plochu jen za pomoci jediného zařízení. Jednalo by se tak o velkou časovou úsporu a usnadnění výroby. Hlavním problémem této technologie je ovšem výrazná pomalost oproti ostatním návrhům. Výrobní proces by probíhal pomocí strategie, která kombinuje Z-průřezy a řádkování. Toto kombinované dokončování je efektivnější než využití pouze jedné ze dvou zmíněných technologií. Daná strategie je však stále výrazně pomalejší a je potřeba ji zefektivnit. Toho je možné dosáhnout zkrácením těl nástrojů a využitím lepších upínacích systémů. Jelikož operace nevyžaduje dlouhá vyložení, je možné

použít kratší nástroje a tím snížit riziko vibrací a nutnosti snižovat řezné podmínky. To samé platí také se speciálními upínači nástrojů, které mají schopnost tlumení vibrací. Určitým problémem zde ovšem může být fakt, že využití kombinovaného dokončování je možné pouze s využitím CAD/CAM systémů. Celkově by bylo nejspíše až nemožné naprogramovat danou tvarovou plochu ručně. Nemění to ale nic na tom, že ne každý provoz má tyto podpory výroby začleněny do svých výrobních procesů. Novodobá CNC centra nám dovolují velkou automatizaci, a jsme tak schopni dosáhnout větší produktivnosti. Stále je ovšem využití 3-osého obrábění v tomto případě pomalejší a méně efektivní než využití například novějšího 5-osého obrábění.

Při obrábění 5-osými obráběcími centry by byly tvarové plochy vyrobeny bokem frézy. Velkou výhodou 5-osého obrábění je možnost naklopení nebo rotace části stroje a tím možného zkrácení těla nástroje. Řezná část ale musí být nadále dostatečně dlouhá pro možné provedení operace. Jelikož výsledný obrobek není dlouhý, můžeme si dovolit při výrobě využít spíše obráběcí centra typu stůl-stůl nebo hlava-stůl a tím zajistit větší tuhost při obrábění. Tato technologie nám také dovoluje využít řadu progresivních obráběcích technologií. Při jejich využití jsme schopni nejen výrazně zvýšit produktivitu, ale také není nutné využívat procesní kapaliny. Ušetří se tak na nákladech za jejich obměňování a nutnost filtrace a odborné likvidace již použitého média. Také u využití progresivních obráběcích technologií, při kterých odchází většina tepla třískou, je možné výrazně navýšit trvanlivost břitů, a tak i méně tepelně zatěžovat obráběný materiál. To má velký vliv nejen na přesnost, ale také na velkou úsporu břitových destiček, které kvůli nutným povlakům nejsou moc levné. Další výhodou a zároveň i nevýhodou je nutnost využívání CAD/CAM systémů. Programy v 5-osách totiž ve většině případů vyžadují, aby byly naprogramovány pomocí počítačových podpor pro jejich náročnost ručního programování. Pokud tedy firma nedisponuje těmito systémy a pracovníky, kteří jsou schopni s nimi zacházet, mohl by toto být hlavní problém pro realizaci 5-osého obrábění na jejich provozu. Jestliže podnik již využívá tyto podpory výroby, je tak schopen nejen využívat 5-osá centra, ale především maximalizovat efektivnost výroby využitím progresivních strategií a co nejvíce snížit dopad chyb vzniklých v předvýrobní části. To je velmi důležitý aspekt, jelikož většina chyb vzniká před zahájením výroby, a tedy při návrhu modelu a samotném výrobním procesu. Tyto chyby se ovšem většinou odhalí až po realizaci výroby a kontrole hotového obrobku. Když tedy budeme schopni minimalizovat riziko vzniku takovýchto chyb, dokážeme zabránit zmetkovosti, a ušetřit tak nutné náklady na jejich nápravu. Centra pro 5-osé obrábění jsou také ve velké míře automatizovaná. Tento výrobní systém je tedy zcela vhodný pro využití u sériových výrob. Jedná se o jednu z nejlepších možností jak předhrubování, tak i dokončování tvarových ploch.

Poslední navrhovanou možností je obrábění abrazivním vodním paprskem. Jak jsem již zmiňoval u hodnocení návrhu řezání vodou, tato technologie je poměrně stará. Až v poslední době se jí ovšem dostává většího uplatnění, než tomu bylo dříve. Stále se jedná o nekonvenční a vcelku progresivní metodu obrábění, a proto ne všechny provozy mohou touto technologií disponovat a nabízí se otázka, jak moc by se v takovémto případě vyplatilo investovat do nových strojů a zaučování zaměstnanců. Určitým problémem je zde ovšem nutnost vlastnění takového stroje, který má možnost naklápění stolu alespoň o 60°. Jen tehdy budeme schopni vyrobit požadovanou tvarovou plochu správně a vyvarovat se zpoždění vodního paprsku a chybě úkosu drážky. Přesto, že se jedná o obrábění vodou s příměsí abraziv, je tato technologie šetrná k životnímu prostředí, a to díky možné recyklaci odpadů. Nevýhodou je změna drsnosti povrchu na obráběné ploše. Od jedné třetiny povrchu směrem ke straně výstupu paprsku se začne drsnost zhoršovat. Proto je potřeba nastavit parametry ovlivňující drsnost co nejlépe, aby byla dosažena co nejlepší kvalita řezu materiálem. Při perfektním nastavení je tak možné udržet stálost drsnosti po celé ploše v dostatečně dobré kvalitě, která naštěstí nemusí být příliš vysoká, jelikož obráběná součást je svařovaná, a nekladou se tak na ni velké požadavky. I tak ale musí být dodrženy určité nutné tolerance přesnosti tvaru a drsnosti povrchu. Jelikož je celý proces řízen počítačově, je obrábění z větší části automatizované. Celkově je tak nejspíše druhou nejlepší možností, jak dané šoupátko vyrobit. Otázkou ovšem zůstává, o jaký provoz se bude jednat a zda bude tento provoz disponovat všemi různými druhy technologií. Pro zjištění, která z těchto dvou metod by byla lepší, je potřeba provést další výzkum a prototypovou výrobu.

Pokud bychom na předhrubování i dokončování využili stejný stroj, jako je to například možné u obrábění vodou, byli bychom schopni ušetřit spoustu času, a zefektivnit tak výrobu. To samé platí pro 5-osé obrábění s výjimkou nutnosti hrubování na 3-osém frézovacím stroji. Obdobně se dá ovšem uvažovat i u dokončování 3-osým obráběním. Tím jsme totiž schopni pro celou tuto část také využít pouze jednu technologii. Celkově tak při realizaci celé zakázky nebo její části jedním stroje není nutný převoz materiálu mezi místy a jeho uskladňování. Také by nebylo nutné tak často měnit pozici obrobku v upínači a tím relativně zjednodušit celý výrobní proces. Jedná se tedy o velkou úsporu času a prostředků vynaložených na výrobu.

Závěr

Celá práce je věnována problematice obrábění tvarových ploch. Rozebírá jejich současnou technologickou situaci a veškeré poznatky aplikuje na návrh výroby skruženého a svařovaného šoupátka z korozivzdorné oceli. Jelikož k rozvoji technologií dochází, vzhledem k jejich návaznosti na sebe, současně, bylo potřeba v teoretické části popsat několik různých oblastí strojírenské výroby. Praktická část poté obsahuje základní poznatky ohledně šoupátek a jejich rozdělení. To bylo důležité pro správné vysvětlení povahy návrhu nového šoupátka ze skruženého a svařovaného materiálu. Návrhy technologií jsem rozdělil na předhrubovací a dokončovací operace. Do nich jsem detailněji rozepsal škálu možností vhodných pro výrobu tvarových částí průniků ploch. Ty musely být vybíraný tak, aby byly co nejvhodnější s ohledem na svařovanou a skruženou povahu polotovaru.

Výsledkem práce je návrh kombinace technologií, kterými je možné zmiňované šoupátko vyrobit co nejefektivněji a nejkvalitněji s co největším ziskem. Nejvhodnější technologií se tak jeví využití 5-osého obrábění bokem frézy jak na předhrubování, tak dokončení s nutností hrubovat povrch tvarové plochy 3-osým obráběním. Dále je možné při předhrubování využít 5-osého obrábění nebo vodního paprsku a zbytek výroby provést pomocí 3-osého obrábění. Dokončovací operace by tak byla provedena kombinací strategií řádkování a Z-průřezy. Velmi zajímavou možností je také celou výrobu uskutečnit jen za pomoci abrazivního vodního paprsku. Všechny zmíněné kombinace vyžadují využití CAD/CAM systémů, s čímž se pojí nutnost vlastnění těchto počítačových podpor pro výrobu a jejich zakomponování do výrobního procesu. To ovšem dovoluje využití jejich progresivních strategií, které jsou nutné aplikovat pro zmiňované technologie. Také je tím umožněno zmenšení rizika chyb vzniklých při návrhové a technologické části předvýrobního procesu. U 3-osého i 5-osého obrábění je možné využít progresivní technologie obrábění, jako je například HSC. Při jejich zakomponování do výroby zvýšíme trvanlivost břitů, a snížíme tak výrobní časy vynaložené na výměnu destiček. To nám také umožňuje realizovat takzvané suché obrábění, a vyhnout se tak nutnosti filtrace a recyklace použitého procesního média.

I přes velké množství výhod je 3-osé frézování podstatně pomalejší než při využití novější technologie 5-osého obrábění. To samé platí pro výrobu pomocí vodního paprsku, který dovoluje celý výrobní proces provést pouze s využitím jednoho stroje. Díky tomu jsou ušetřeny náklady na transport a uskladnění kusu v mezivýrobním čase. Vzhledem k menšímu počtu nutných upnutí a transportu kusů mezi zařízeními dojde také ke zkrácení výrobních časů. Je tedy otázka, zdali by bylo výhodnější pro výrobu využít 5-osé obrábění nebo abrazivní vodní paprsek. Pro toto rozhodnutí by musel být proveden další rozsáhlý výzkum s prototypní výrobou pomocí obou technologií. Nachází se zde také alternativní možnost přesunutí části výroby do jiné firmy zaměřující se například na řezání vodním paprskem. Předhrubovací operace by tak byla provedena jinde a bylo by nutné pouze dokončit tvarové plochy za pomoci 3-osého nebo 5-osého obrábění.

Literatura

- [1] BRYCHTA, Josef, Marek SADÍLEK, Robert ČEP a Jana PETRŮ. *Progresivní metody v obrábění: studijní opora*. Ostrava: VŠB-TUO, Fakulta strojní, katedra obrábění a montáže, 2011. ISBN 978-80-248-2513-7.
- [2] *Cad.cz: CAM systémy a výroba tvarových ploch* [online]. [cit. 2020-02-11]. Dostupné z: <https://www.cad.cz/strojirenstvi/38-strojirenstvi/2321-cam-systemy-a-vyroba-tvarovych-ploch.html>
- [3] SADÍLEK, Marek. *CAM systémy v obrábění I*. 2. dopl. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2010. ISBN 978-80-248-2278-5.
- [4] *Elearn.vsb.cz: Nové směry v progresivním obrábění* [online]. Ostrava: Ediční středisko VŠB – TUO, 2007 [cit. 2020-02-11]. Dostupné z: <http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/NSPO/texty.pdf>
- [5] SADÍLEK, Marek. *Obrábění I: výběr přednášek*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2015. ISBN 978-80-248-3857-1
- [6] *Sandvik.coromant.com/: Silent Tools* [online]. [cit. 2020-02-17]. Dostupné z: https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/products/silent_tools/pages/default.aspx
- [7] *Sandvik.coromant.com: Obrábění s velkým vyložením nástroje – důležitá hlediska* [online]. [cit. 2020-02-17]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/machine-tooling-solutions/tooling-considerations/pages/long-overhangs.aspx>
- [8] *Projekty.fs.vsb.cz: Počítačová podpora procesu obrábění* [online]. Ostrava: Fakulta strojní VŠB–TUO, 2012 [cit. 2020-02-18]. Dostupné z: http://projekty.fs.vsb.cz/459/ucebniopory/Pocitacova_podpora_procesu%20_obrazeni.pdf
- [9] *Sandvik.coromant.com: Frézování tvarových ploch* [online]. [cit. 2020-02-18]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/pages/profile-milling.aspx>
- [10] BRYCHTA, Josef. *Progresivní technologie v obrábění a NC programování obráběcích strojů*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2014. ISBN 978-80-248-3522-8.
- [11] *Projekty.fs.vsb: Počítačová podpora výroby* [online]. Ostrava: Ediční středisko VŠB – TUO, 2011 [cit. 2020-02-23]. Dostupné z: <http://projekty.fs.vsb.cz/147/ucebniopory/978-80-248-2738-4.pdf>
- [12] *Mmspektrum.com: Vyspělé strategie ve 3D frézování* [online]. 2004 [cit. 2020-03-05]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/vyspele-strategie-ve-3d-frezovani.html>

- [13] *Nastrojarna.oneindustry.one: Proč používat strategii trochoidního frézování* [online]. 2018 [cit. 2020-03-05]. Dostupné z: <https://nastrojarna.oneindustry.one/proc-pouzivat-strategii-trochoidniho-frezovani/>
- [14] *Mmspektrum.com: Ekologické a technologické aspekty HSC obrábění* [online]. MM, 2001 [cit. 2020-03-12]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/ekologicke-a-technologicke-aspekty-hsc-obrabeni.html>
- [15] *Mmspektrum.com: Vysokorychlostní obrábění – klíč k vyšší produktivitě* [online]. MM, 2010 [cit. 2020-03-12]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/vysokorychlostni-obrabeni-klic-k-vyssi-produktivite.html>
- [16] *Technickytydenik.cz: Akademie CNC obrábění* [online]. 2009 [cit. 2020-03-12]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/serialy/akademie-cnc/akademie-cnc-obrabeni-13_8548.html
- [17] *Secotools.com: High Feed Mills* [online]. seco [cit. 2020-03-13]. Dostupné z: https://www.secotools.com/article/m_6904?language=en
- [18] *Tungaloy.com: High-Feed Milling Mechanism* [online]. [cit. 2020-03-13]. Dostupné z: <https://www.tungaloy.com/highfeed/>
- [19] *Harveyperformance.com: How To Combat Chip Thinning* [online]. 2017 [cit. 2020-03-13]. Dostupné z: <https://www.harveyperformance.com/in-the-loupe/combat-chip-thinning/>
- [20] *Udrzbapodniku.cz: Pasivně-dynamická technologie tlumení vibrací zvyšuje produktivitu obrábění kovů* [online]. 2017 [cit. 2020-03-14]. Dostupné z: <http://udrzbapodniku.cz/hlavni-menu/artikuly/artikul/article/pasivne-dynamicka-technologie-tlumeni-vibraci-zvysuje-produktivitu-obrabeni-kovu/>
- [21] *Mmspektrum.com: Polygonální upínače nástrojů* [online]. MM, 2014 [cit. 2020-03-14]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/polygonalni-upinace-nastroju.html>
- [22] *Mmspektrum.com: Moderní systémy pro upínání stopkových nástrojů* [online]. MM, 2006 [cit. 2020-03-15]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/moderni-systemy-pro-upinani-stopkovych-nastroju.html>
- [23] *Winter-servis.cz: Princip přesného univerzálního upínače - Sino* [online]. [cit. 2020-03-15]. Dostupné z: http://www.winter-servis.cz/index.php?page=schunk/n_sino
- [24] *Technickytydenik.cz: Upínače nástrojů (2)* [online]. 2012 [cit. 2020-03-15]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/obrabeci-stroje-a-jejich-prislusenstvi/upinace-nastroju-2_8498.html
- [25] *Mmspektrum.com: Tepelné upínání nástrojů* [online]. MM, 2015 [cit. 2020-03-15]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/tepelne-upinani-nastroju-11885.html>
- [26] SADÍLEK, Marek a Robert ČEP. *Dílčí roční zpráva k projektu TRIO_FV40115: Technologická a výrobní část*. Ostrava, 2020.